

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

CÁSSIA BARRETO SOARES

**Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação e Lógica Fuzzy para análise do
estado nutricional de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner**

Alegre – ES

2020

CÁSSIA BARRETO SOARES

Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação e Lógica Fuzzy para análise do estado nutricional de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal na linha de pesquisa Solo e Água e Interação com Plantas.

Orientador: Prof. D. Sc. Julião Soares de Souza Lima

Coorientador: Prof. D. Sc. Samuel de Assis Silva

Alegre - ES

2020

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S676s Soares, Cássia Barreto, 1991-
Sistema integrado de diagnose e recomendação e lógica fuzzy para análise do estado nutricional de Coffea canephora Pierre ex Froehner / Cássia Barreto Soares. - 2020.
63 f. : il.

Orientador: Julião Soares de Souza Lima.
Coorientador: Samuel de Assis Silva.
Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Lógica difusa. 2. Cafeeiro. 3. Cultivos agrícolas. 4. Plantas - Nutrição. I. Lima, Julião Soares de Souza. II. Silva, Samuel de Assis. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 63

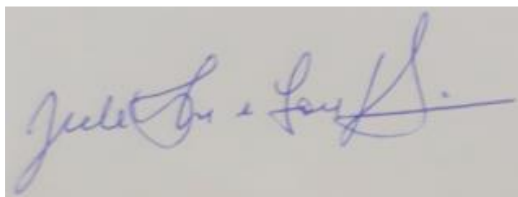
CÁSSIA BARRETO SOARES

Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação e Lógica Fuzzy para análise do estado nutricional de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner

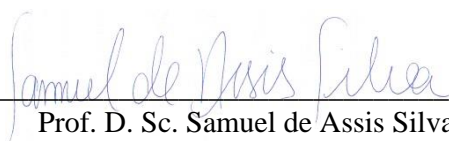
Dissertação apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal na área de concentração Solo e Água e Interação com Plantas.

Aprovada em 28 de Setembro de 2020

COMISSÃO ORGANIZADORA



Prof. D.Sc. Julião Soares de Souza Lima
Centro de Ciências Agrária e Engenharias – UFES
Orientador



Prof. D. Sc. Samuel de Assis Silva
Centro de Ciências Agrárias e Engenharias – UFES
Coorientador



Prof. D. Sc. Abel Souza da Fonseca
Escola Agrícola de Ibitirama – EFAI/MEPE

Aos meus pais e irmãos.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida e por me permitir concluir mais uma etapa na minha vida.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro na Bolsa de estudo para a realização do Mestrado.

Ao Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo (CCAUE-UFES) e ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pela oportunidade.

Ao CNPq pelos recursos financeiros disponibilizados para a realização desta pesquisa.

Aos meus pais Emília e Eliude, e aos meus irmãos Bruno e Gabriella, pelo apoio e compreensão.

Ao meu orientador Prof. Dr. Julião Soares de Souza Lima, pela dedicação, ensinamentos, conselhos e paciência.

Ao meu Coorientador Prof. Dr. Samuel de Assis Silva, pela coorientação e disponibilidade.

À Larissa e Jéssica por sempre estarem comigo mesmo que distante e apoiando sempre.

À Geórgia pela amizade de 20 anos e o apoio de sempre.

Às minhas amigas Liana, Mila, Amanda e Sandy, pelo companheirismo, sempre dispostas a escutar as lamentações e pelos melhores cafés da tarde.

À Lia que surgiu lá da Colômbia para ser uma grande amiga, me ensinando cada dia a ser melhor.

A todos aqueles que direta e indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

RESUMO

Objetivou-se com este trabalho utilizar a classificação fuzzy (CF) como metodologia na padronização dos teores dos nutrientes foliares com base nas faixas de suficiência (FS) (baixa, adequada e alta) para a análise da distribuição espacial do estado nutricional do *Coffea canephora*. O estudo foi realizado em uma lavoura comercial de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner, em Cachoeiro de Itapemirim-ES, em uma área com uma malha irregular de 80 pontos para o amostragem de folhas das plantas para determinação dos teores de Nitrogênio (N), Cálcio (Ca), Potássio (K), Magnésio (Mg), Enxofre (S), Fósforo (P), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Boro (B), Zinco (Zn) e Cobre (Cu). Com os teores dos nutrientes foi realizada a análise descritiva e, posteriormente, o diagnóstico nutricional das plantas com o sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) e a faixa de suficiência (FS). Na CF, as variáveis de entrada (INPUT) foram os teores dos nutrientes e as FS foram transformadas em variáveis linguísticas e analisadas pelos modelos matemáticos: triangular para Baixo e Alto e o modelo trapezoidal para Adequado. O método utilizado na defuzzificação após estabelecimento das regras foi o do centróide. O método de interpolação inverso do quadrado da distância (IDW) foi utilizado para construir os mapas. Com a finalidade de comparação dos dados originais e os defuzzificados, foram determinados: o coeficiente de correlação de Pearson, o índice de concordância e o índice de confiança entre os mapas. Os nutrientes S, Fe e Cu apresentaram teores adequados; N, K e Mg, teores na faixa de baixa suficiência; e Ca, P, Mn, B e Zn, teores elevados. Os coeficientes de correlação do Ca, Mg e Fe com a produtividade apresentaram correlação significativa e positiva. Os dados dos macronutrientes de entrada e de saída apresentaram alta correlação. Os modelos matemáticos escolhidos e as regras de inferências adotadas na classificação fuzzy padronizaram em mesma escala os valores do limite inferior e o superior da faixa adequada de suficiência para os macros e micronutrientes, permitindo a construção do mapa médio do estado nutricional da lavoura. O N e o Zn foram os nutrientes limitantes por falta e excesso, respectivamente, pelo DRIS. O índice de balanço nutricional médio (IBNm) apresentou correlação significativa ($r = 0,65$) com a produtividade da lavoura (sc/ha).

Palavras chave: faixa de suficiência; Mamdani; distribuição espacial; balanço nutricional.

ABSTRACT

This work carried out to use a fuzzy classification (FC) as a methodology in the standardization of leaf nutrient based on the sufficiency ranges (FS) (low, adequate and high) for the analysis of the spatial distribution of the nutritional status of *Coffea canephora*. The study was carried out in a commercial crop of *Coffea canephora* Pierre ex Froehner, in Cachoeiro de Itapemirim-ES, in an area with an irregular mesh of 80 points for the sampling of leaves of plants to determine the contents the Nitrogen (N), Calcium (Ca), Potassium (K), Magnesium (Mg), Sulfur (S), Phosphorus (P), Iron (Fe), Manganese (Mn), Boron (B), Zinc (Zn) and Copper (Cu). With the nutrient contents, descriptive analysis was performed and the nutritional diagnosis of plants was subsequently performed with the integrated diagnosis and recommendation system (IDRS) and the sufficiency range (SR). In FC, the input variables (INPUT) were the nutrient contents and the SR were transformed into linguistic variables and analyzed by mathematical models: triangular for Low and High and the trapezoidal model for suitable. The method used in defuzzification after the establishment of the rules was that of the centroid. The inverse interpolation method of the square of the distance (IDW) was used to build the maps. Pearson's correlation coefficient, the agreement index and the confidence index between the maps was determined in order to compare the original and defuzzified data. The nutrients S, Fe and Cu showed adequate levels, N, K and Mg levels in low sufficiency, Ca, P, Mn, B and Zn high levels. The correlation coefficients of Ca, Mg and Fe with productivity showed significant and positive correlation. Data from the input and output macronutrients showed a high correlation. The mathematical models chosen and the rules of inferences adopted in the fuzzy classification standardized on the same scale the values of the lower and upper limits of the adequate sufficiency range for macros and micronutrients, allowing the construction of the average map of the nutritional status of the crop. N and Zn were the limiting nutrients due to lack and excess, respectively, by IDRS. The average nutritional balance index (NBIm) showed a significant correlation ($r = 0,65$) wip crop yield (bags/hectare).

Keywords: sufficiency range; Mamdani; spatial distribution; Nutritional balance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Modelo de elevação da área de estudo. _____	24
Figura 2. Fluxograma da modelagem fuzzy. _____	28
Figura 3. Exemplificação do método do centróide para determinação do grau de pertinência (GP) (índice fuzzy). _____	29
Figura 4. Distribuição espacial do N (a), IFN (b), K (c) e IFK (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS) _____	40
Figura 5. Distribuição espacial do Ca (a), IFCa (b), Mg (c) e IFMg (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS) _____	41
Figura 6. Distribuição espacial do S (a), IFS (b), P (c) e IFP (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS) _____	42
Figura 7. Distribuição espacial do Fe (a), IFFe (b), Mn (c) e IFMn (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS) _____	45
Figura 8. Distribuição espacial do B (a), IFB (b), Zn (c) e IFZn (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS) _____	46
Figura 9. Distribuição espacial do Cu (a) e IFCu (b) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS) _____	47
Figura 10. Distribuição espacial média e porcentagem de área (PA), por faixa de suficiência dos dados defuzzificados, para os macronutrientes considerando as faixas de suficiência (FS) _____	49
Figura 11. Distribuição espacial média e porcentagem de área (PA), por faixa de suficiência, para os micronutrientes _____	49
Figura 12. Distribuição espacial da produtividade da lavoura com dados originais e após defuzzificação _____	50
Figura 13. Distribuição espacial do índice de balanço nutricional (IBNm) da lavoura _____	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Faixas de suficiência (FS) e do Nível crítico (NC) dos nutrientes para interpretação da análise foliar na cultura do C. canephora. _____	26
Tabela 2. Intervalos definidos na modelagem para cada variável linguística e para cada nutriente foliar _____	31
Tabela 3. Regras de inferência para a defuzzificação dos dados de entrada (INPUT) para cada nutriente foliar. _____	31
Tabela 4. Análise descritiva dos macronutrientes (dag.kg-1) e dos micronutrientes (mg.kg-1) foliares do café conilon. _____	35
Tabela 5. Correlação de Pearson ($p < 0,05$), significativa, entre os macros e micronutrientes dos tecidos foliares do café conilon _____	38
Tabela 6. Resultado da porcentagem de área (PA%) nos mapas para as três classes da faixa de suficiência para os dados defuzzificados e originais e o coeficiente de correlação linear (rL) entre os dados originais e após defuzzificados e, também, entre os mapas (r_F). _____	48
Tabela 7. Resultados dos índices DRIS _____	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1. Geral	13
2.2. Específicos	13
3. REVISÃO DE LITERATURA	14
3.1. Lógica Fuzzy	14
3.2. Estado Nutricional	15
3.2.1. Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação	16
3.2.2. Macronutrientes	17
3.2.3. Micronutrientes	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	24
4.1. Localização do experimento	24
4.2. Caracterização da lavoura e amostragem	24
4.3. Análise dos dados observados	25
4.4. Interpretação do estado nutricional	26
4.4.1. Faixa de suficiência (FS) e nível crítico (NC)	26
4.4.2. Sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS)	26
4.5. Classificação fuzzy	27
4.5.1. Modelagem fuzzy	30
4.6. Método de Interpolação	32
4.7. Mapa nutricional médio	33
4.8. Comparação entre os mapas originais e defuzzificados	33
4.9. Análise do DRIS e da Produtividade	34
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
5.1. Análise descritiva	35
5.2. Interpretação nutricional	36
5.3. Correlação entre nutrientes e a produtividade	37

5.4.	Análise da defuzzificação	39
5.4.1.	Macronutrientes	39
5.4.2.	Micronutrientes	44
5.4.3.	Mapas médios	48
5.4.4.	Produtividade	50
5.5.	Interpretação do DRIS e do IBN	51
6.	CONCLUSÕES	53
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54

1. INTRODUÇÃO

A cafeicultura é uma atividade agrícola de extrema importância no Brasil, visto que o Brasil é o maior produtor e exportador de café no mundo, influenciando positivamente na economia do país gerando empregos e renda. Além da produção, o país também é um grande consumidor da *commoditie*, que está cada vez mais exigente em qualidade, o que influencia na busca e implantação por novas tecnologias nas lavouras para atender o mercado. No Brasil, ocorre em maiores áreas, o cultivo das espécies café arábica (*Coffea arábica* L.) e conilon (*Coffea canephora* Pierre ex Froehner).

No estado do Espírito Santo, a cafeicultura está presente em todos os municípios, exceção da capital, respeitando as características climáticas e a espécie mais indicadas para as diferentes regiões. Assim, o estado é o maior produtor nacional de café conilon, responsável por aproximadamente 70% da produção do país (CONAB, 2019).

A exigência por qualidade do mercado consumidor impulsionou a adoção de novas técnicas de manejo na cafeicultura, visando reduzir a aplicação de insumos e minimizar perdas na colheita em decorrência de novas perspectivas de tornar mais lucrativo o cultivo (SILVA; LIMA, 2012). Uma das tecnologias que vem se destacando para o gerenciamento das lavouras é a cafeicultura de precisão que correlaciona a produtividade com os atributos físicos e químicos do solo e das folhas, identificando zonas de manejo para adubação localizada (CARVALHO et al., 2017).

Na cafeicultura, a análise química foliar possibilita detectar respostas das plantas aos vários tipos de manejo adotado, permitindo interpretar de maneira eficiente as relações entre nutrientes nas plantas e inferir no sistema solo/planta em busca de melhores resultados produtivos (FARNEZI et al., 2010). Lima et al. (2016) afirmaram que a análise foliar baseia-se no fato de existir correlação direta entre a taxa de crescimento e o teor de nutrientes nos tecidos foliares.

Para entender o estado nutricional do cafeeiro, alguns métodos têm sido utilizados, tais como: a) análise multivariada, reduzindo o número de variáveis (SILVA; LIMA, 2012); b) geoestatística, quantificando a variabilidade espacial dos nutrientes na lavoura (FONSECA et al., 2015); c) Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação (DRIS), determinando o índice do balanço nutricional (IBN) (SILVA; LIMA; QUEIROZ, 2011), e; d) classificação fuzzy, automatizando a interpretação e a tomada de decisão sobre práticas de manejo (LIMA et al.,

2016). Essas ferramentas, quando utilizadas em associação, permitem determinar a distribuição espacial de atributos da lavoura e auxilia em recomendações mais equilibradas nas adubações.

Hipóteses:

- A transformação das concentrações dos macros e dos micronutrientes foliares em graus de pertinências fuzzy, considerando as faixas de suficiência, possibilita padronizar os limites inferiores e superiores com valores constantes na faixa adequada para todos nutrientes.
- Com os graus de pertinência fuzzy é possível construir os mapas médios do estado nutricional para os macros e os micronutrientes.
- O nutriente na baixa adequada e/ou na alta de suficiência nutricional contribui negativamente no estado nutricional segundo o Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS).

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Classificação fuzzy como metodologia na padronização da unidade dos nutrientes foliares com base nas faixas de suficiência (FS) (Baixa, Adequada e Alta) para a análise da distribuição espacial do estado nutricional do *C. canephora* e a disponibilidade nutricional com base no Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS).

2.2. Específicos

- Definir índices fuzzy na padronização de mesmo valor para os limites inferiores e superiores da faixa adequada de suficiência para todos os nutrientes do tecido foliar;
- Determinar os mapas médios da distribuição espacial dos índices fuzzy para os macros e os micronutrientes mostrando o estado nutricional da lavoura;
- Utilizar o sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) para identificação dos nutrientes foliares limitantes por falta e por excesso;

- Determinar a distribuição espacial do índice de balanço nutricional médio (IBNm) da lavoura e correlacionar com a produtividade.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1. Lógica Fuzzy

As bases para a utilização da lógica fuzzy na análise de sistemas e processos de decisão cuja complexidade permitia a utilização de técnicas matemáticas convencionais foi desenvolvido por Zadeh (1973). No trabalho foi estabelecido, o termo algoritmo fuzzy, definido como um conjunto ordenado de instruções fuzzy, cuja execução produz uma solução aproximada para um determinado problema.

Na lógica clássica (Booleana), os atributos são trabalhados no sistema binário de sim ou não; verdade ou falso; pertence ou não pertence; ou seja, em apenas dois conjuntos, ou está em um ou em outro conjunto segundo a definição de cada. Já na teoria dos conjuntos fuzzy, o atributo pode ser representado matematicamente por um valor que represente o seu grau de pertinência (GP) em mais de uma classe. Os GP variam a partir de 0 a 1, onde 0 é quando o atributo não pertence ao conjunto, entre os intervalos são graus de pertinência que assume para cada valor e 1 é quando o elemento pertence totalmente ao conjunto (CAMPOS FILHO, 2004).

A lógica fuzzy traduz as expressões verbais vagas, imprecisas e qualitativas oriundas da comunicação humana em valores numéricos (MARÇAL; SUSIN, 2005). Como exemplo de atribuições de termos linguísticos a variáveis reais, são os adjetivos, rápido, lento, alto, baixo, próximo, distante, quente, frio, etc. Com isso, o elemento pode pertencer a um conjunto em um determinado grau, caracterizando o Grau de Pertinência (SOUZA, 2009).

Um classificador fuzzy possui quatro componentes: um processador de entrada (ou fuzzificador), um conjunto de regras lingüísticas, um método de inferência fuzzy e um processador de saída (ou defuzzificador), gerando um número real como saída. Inferência fuzzy é o método que interpreta as variáveis de entrada e, baseado em algum conjunto de regras, designa valores para a saída (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998).

Diversos são os exemplos da utilização da Lógica fuzzy na agricultura. Um exemplo é o estudo da ferrugem asiática da soja realizada por Alves (2006), em que o objetivo era estimar o processo monocíclico da ferrugem, assim foi possível identificar as áreas favoráveis a doença, em Minas Gerais, com base nas variáveis independentes: temperatura, molhamento foliar e as variáveis dependentes: área abaixo da curva de progresso da incidência e severidade da doença.

O risco de infestação de plantas daninhas foi estudado por Bressan et al. (2006), levando em conta a sua variabilidade espacial na área, visando definir o mapa do risco de infestação por regiões, procurando o aumento na eficiência da aplicação de insumos, reduzindo custos e o impacto ambiental, tornando o ambiente agrícola melhor controlado.

Lima et al. (2016) utilizaram a classificação fuzzy para determinar zonas de manejo para as necessidades de calagem, nitrogênio, fósforo e potássio em lavoura de *C. canephora*, tendo os valores defuzzificados em escala de notas para definição das zonas para aplicação diferenciada da fertilização do solo. Gonçalves (2019) utilizou a classificação fuzzy para mapear regiões com boa aptidão edafoclimática para o cultivo do cacaueteiro em sequeiro no Estado do Espírito Santo, concluindo que é possível expandir o cultivo da cultura.

3.2. Estado Nutricional

Diversos fatores podem afetar o desenvolvimento e a produção das plantas, como irrigação, tipo de solo, fatores climáticos, nutrição, doenças e pragas, entre outros. Para que a nutrição da planta seja adequada, deve-se identificar os nutrientes limitantes, para a quantidade fornecida, a época e forma de aplicação sejam corretas (MARTINEZ; NEVES; ZABINI, 2003).

A avaliação do estado nutricional com seus vários métodos visa conhecer os nutrientes que estão limitando o crescimento e a produção da cultura (FAQUIN, 2005). Os métodos do nível crítico (NC) e das faixas de suficiências (FS) são amplamente utilizados, em que comparam os teores dos nutrientes foliares, normalmente disponibilizados na literatura, de uma lavoura comercial com os padrões de referência obtidos de plantas sadias e com elevada produtividade (KURIRAHA; MAEDAS; ALVAREZ, 2005).

O método da FS foi adotado para a interpretação do estado nutricional da lavoura que, segundo Martinez; Neves e Zabini (2003), melhora a flexibilidade da avaliação do estado nutricional em relação ao método de NC. O NC se refere à concentração do nutriente na matéria seca das folhas

acima da qual não haverá, ou é pouco provável, resposta à aplicação de nutrientes no solo (BRAGANÇA; PREZOTTI; LANI, 2007).

A FS é uma análise do estado nutricional, em que as concentrações dos nutrientes estão na faixa de 90 a 100% da produção máxima da cultura (FONTES, 2001). É de extrema importância a análise dos nutrientes no tecido vegetal para a decisão e adoção da fertilização do plantio, uma vez que os nutrientes estão sendo disponibilizados adequadamente (COVRE; PARTELLI, 2016). Nas folhas, que são utilizadas para análise vegetal de nutrientes, ocorrem diversos processos metabólicos, inclusive a produção de grande parte de fotoassimilados, e ainda onde os nutrientes absorvidos são translocados (COVRE et al., 2018).

Fonseca (2018) comenta que o NC é um valor fixo definido, que na sua visão dificulta na análise por não encontrar resultados exatos na análise foliar. Assim, existem dificuldades de determinar a deficiência ou o excesso dos nutrientes e a identificação dos mais problemáticos quando a planta possui mais de uma deficiência nutricional (MARTINEZ; NEVES; ZABINI, 2003). Segundo Martinez, Carvalho e Souza (1999), o método de faixa da FS é o mais empregado nos estudos de cafeeiros.

O cafeeiro pode acumular diferentes quantidades dos nutrientes, o que é influenciado por características inerentes a planta e, também, do ambiente, como: espécie, variedade, estado fisiológico da planta, condições climáticas, disponibilidade de água e dos nutrientes, sistema radicular da planta, condição fitossanitária, manejo adotado na lavoura e também as interações que podem ocorrer entre os nutrientes (BRAGANÇA; PREZOTTI; LANI, 2007).

De acordo com Bragança (2005), no cafeeiro *C. canephora*, a ordem de acúmulo dos macronutrientes é: $N > Ca > K > Mg > S > P$ e dos micronutrientes: $Fe > Mn > B > Zn > Cu$, no tecido foliar.

3.2.1. Sistema Integrado de Diagnose e Recomendação (DRIS)

O método DRIS foi desenvolvido por Beaufils (1973) para avaliação do estado nutricional das plantas, em que é calculado um índice para cada nutriente. A avaliação é realizada em função da relação dos teores de cada nutriente com os outros (ex.: P/N, P/K e P/Ca), que são comparadas com as relações padrões, as normas DRIS. O nutriente encontra-se em equilíbrio com os demais

quando o índice DRIS é zero (PAYNE; RECHCIGL; STEPHENSON, 1990). O valor do índice DRIS positivo indica o excesso do nutriente em relação ao outro e o índice DRIS negativo indica a deficiência em relação ao outro (REIS JÚNIOR et al., 2002).

O Índice de Equilíbrio Nutricional (IQN) é o somatório dos valores absolutos dos índices DRIS (BALDOCK; SCHULTE, 1996), o que reflete o equilíbrio nutricional da lavoura amostrada, assim um menor valor do IQN representa um menor desequilíbrio entre os nutrientes (SNYDER; KRETSCHMER, 1988). Também conhecido na literatura como Índice de Balanço Nutricional (IBN) (WADT et al., 1998).

Os valores de referência da análise dos nutrientes dos tecidos foliares são determinados com base em lavoura de alta produtividade. Várias culturas agrícolas têm estes valores determinados, tais como: a cultura da laranja (DIAS et al., 2013); a cana-de-açúcar (SANTOS et al., 2013); o algodão (KURIHARA et al., 2013; SERRA et al., 2013); e a soja (SANTOS NETO, 2019). Para o café conilon cultivado na região norte do estado do Espírito Santo, os valores de referência foram determinados por Partelli et al. (2016), para as lavouras na pré-florada e no enchimento dos grãos, com produtividade superior a 100 sacas por hectare ($sc\ ha^{-1}$).

Reis Júnior et al. (2002) realizaram a comparação dos diagnósticos nutricionais das lavouras cafeeiras do sul de Minas Gerais com padrões da literatura, estabeleceram normas DRIS e sugeriram valores de teores foliares de referência para a diagnose nutricional, para a localidade do sul de Minas Gerais, reforçando a importância da utilização de normas DRIS adequadas, assim encontraram diferentes diagnoses dos padrões anteriormente propostos.

3.2.2. Macronutrientes

3.2.2.1. Nitrogênio (N)

O N é integrante de aminoácidos, proteínas, ácidos nucléicos, amidas, hexoaminas, coenzimas, nucleotídeos e outros compostos. É utilizado no crescimento da vegetação, na expansão da área foliar e na formação de botões florais e encontra-se principalmente, nos cloroplastos das folhas, sendo fundamental na atividade fotossintética, que promoverá maior produção de amido e de outros carboidratos necessários para a formação e o desenvolvimento dos frutos (MALAVOLTA, 1986, TAIZ; ZIEGER, 2004).

Na época de granação dos frutos ocorre translocação do nutriente, que pode resultar na deficiência do mesmo se não for realizado o suprimento (MARSCHNER, 1995). Em lavoura com baixa relação folhas/frutos a deficiência é crítica (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002). Outros fatores relacionados ao sistema radicular, característica do solo, regime de chuvas podem influenciar na deficiência de N (MATIELLO et al., 2002). Bragança (2005) afirmou que o N é o macronutriente que tem maior percentual de acúmulo de concentração nos tecidos foliares.

3.2.2.2. Cálcio (Ca)

O Ca é constituinte da lamela média das paredes celulares, cofator de enzimas e também atua como mensageiro secundário na regulação metabólica (TAIZ; ZIEGER, 2004). Atua na ramificação (MATIELLO et al., 2002), no sistema radicular (ACCORSI e HAAG, 1959), na retenção de folhas, desenvolvimento das gemas, maturação dos frutos e formação de proteínas (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002). É utilizado no fuso mitótico durante a divisão celular (TAIZ E ZIEGER, 2004) e aumenta a germinação e crescimento do pólen (MARSCHNER,1995). Para Bragança (2005), o Ca é o segundo macronutriente mais acumulado nas folhas no cafeeiro conilon.

3.2.2.3. Potássio (K)

O K é cofator de mais de 40 enzimas, participa ativamente da regulação da turgescência e também atua na síntese e transporte dos carboidratos. Também é importante na fotossíntese, abertura e fechamento de estômatos, respiração e circulação de seiva (TAIZ; ZIEGER, 2004). Para o cafeeiro, o K pode melhorar a resistência da planta as pragas e doenças, a seca e ao frio (MATIELLO et al., 2002).

Outra importância do K na fisiologia do cafeeiro está relacionada à formação dos frutos, onde o K participa na ativação da síntese de amido. O teor de amido diminui nos ramos e nas folhas à medida que aumenta a produção o que pode levar ao esgotamento antes do amadurecimento dos frutos (RENA; CARVALHO, 2003). A deficiência K pode ocorrer por excesso de calagem, devido ao antagonismo com Mg e Ca (MALAVOLTA, 1986; GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002). A deficiência é maior no período de desenvolvimento dos frutos (MATIELLO et al., 2002). Segundo Bragança (2005), o K é o terceiro nutriente mais acumulado pelo *C. canephora*.

3.2.2.4. Magnésio (Mg)

Os processos metabólicos e as reações particulares influenciados pelo Mg incluem: fotofosforilação (como a formação de ATP nos cloroplastos); fixação fotossintética do dióxido de carbono; sínteses proteicas; formação de clorofila; transporte no floema; separação e utilização da clorofila; geração de espécies reativas de oxigênio; fotooxidação nos tecidos foliares. Na maioria dos casos, o envolvimento do Mg nos processos metabólicos depende da ativação de numerosas enzimas (CAKMAK; YAZICI, 2010). O Mg é considerado o cofator de mais de 300 enzimas, incluindo carboxilases, fosfatases, quinases, RNA polimerases e ATPases (SHAUL, 2002).

A conversão de energia é uma das principais funções dos cloroplastos, sendo o Mg o ativador das enzimas relacionadas ao metabolismo energético (MALAVOLTA, 1980). O átomo de Mg não participa diretamente na bioquímica da molécula de clorofila sua função, em vez disso, participa da manutenção da configuração esférica da clorofila (EPSTEIN; BLOOM, 2006). Esse nutriente tem participação fundamental na exportação dos fotoassimilados no floema, sua deficiência ocasiona incrementos na acumulação de carboidratos nas folhas e restringe a fixação de CO₂ (HERMANS et al., 2004). A deficiência está geralmente associada a solos ácidos ou em situações que provoquem desequilíbrio, como excesso de adubação de K ou uso de calcário calcítico (MATIELLO et al., 2002). A seca também pode levar a planta a sofrer deficiência de Mg (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002). Segundo Bragança (2005) o Mg é o quarto nutriente mais acumulado no café conilon e a maior parte nas folhas.

3.2.2.5. Enxofre (S)

O S é componente da cistina, metionina, cisteína, proteínas, ácido lipóico, coenzima A, tianina pirofosfato, glutatona, biotina, adenosina-5-fosfosulfato e fosfoadenosina e participa na síntese de clorofila (TAIZ; ZIEGER, 2004). Segundo Guimarães, Mendes e Souza (2002) é muito importante no desenvolvimento do sistema radicular.

Ocorre uma forte interação do S com o N, geralmente constituintes de proteínas, suas quantidades devem ser equilibradas para não interferir no crescimento e produção das culturas (MARSCHNER, 2012). O S no *C. canephora* dentre os macronutrientes foi o quinto acumulado na planta, com a maior parte concentrada nas folhas (BRAGANÇA, 2005).

3.2.2.6. Fósforo (P)

O P é constituinte de ácidos nucleicos, nucleotídeos, fosfolipídios, fosfato, coenzimas, açúcares, ácido fítico, entre outros. Atua na síntese e no armazenamento de energia, sendo componente com três moléculas na Adenosina trifosfato (ATP). Atua também nas reações de esterificação com açúcares e outros compostos utilizados na respiração e na fotossíntese (TAIZ; ZIEGER, 2004).

Ao decorrer do desenvolvimento da planta, o P é fornecido cada vez menos. É um nutriente pouco exigido pela planta, mas a absorção se torna intensa na época de desenvolvimento dos frutos (MALAVOLTA, 1986). O excesso do P pode influenciar na deficiência de Cu, Fe, Mn e Zn, pois diminui a absorção e/ou transporte para parte aérea destes nutrientes (MALAVOLTA; FERNADEZ; ROMERO, 1993). No estudo de Bragança (2005), o P foi o macronutriente que menos se acumulou no *C. canephora*.

3.2.3. Micronutrientes

3.2.3.1. Ferro (Fe)

O Fe é um elemento abundante na crosta terrestre e participa na maioria dos processos fisiológicos dos organismos, como respiração, fixação biológica de nitrogênio, fotossíntese (GURZAU; NEAGU; GURZAU, 2003), síntese de hormônios e DNA (BECANA et al.1998, BRIAT; LOBRÉAUX, 1997). Portanto, o Fe é importante para o desenvolvimento e o crescimento das plantas (KERBAUY, 2008), participa também de funções metabólicas como a biossíntese de diversas proteínas e da clorofila (MARSCHNER, 1995). As enzimas que o Fe é integrante estão envolvidas na cadeia transportadora de elétrons, no ciclo do ácido cítrico e em processos que ocorrem em diversas organelas celulares como, nos cloroplastos e nas mitocôndrias (JEONG; CONNOLLY, 2009, KOBAYASHI; NISHIZAWA, 2012).

As ferritinas são proteínas especializadas no armazenamento e libertação de Fe nas células, numa forma não tóxica, mas disponível para as plantas (MARTINS, 2017). Encontram-se em maior concentração em folhas jovens e senescentes, onde a atividade fotossintética é menor, isto é, onde são necessárias menores quantidades de Fe. Em menores quantidades, estas proteínas também estão presentes nas raízes, onde atuam como “buffer” e controlam o fluxo de Fe após

a absorção. Os efeitos benéficos deste micronutriente estão condicionados pela presença de ferritina (BAUER; HELL, 2006; BIENFAIT, 1989; BRIAT; CELLIER; GAYMARD, 2006).

A deficiência inicia nas folhas novas, devido à sua baixa mobilidade na planta (MARSCHNER, 1995), e esta deficiência pode acontecer quando a planta está em crescimento rápido (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002). Sob deficiência de Fe há diminuição da clorofila e de outros pigmentos que captam luz, assim como das atividades de carregadores de elétrons de ambos os fotossistemas. Portanto, a deficiência de Fe afeta inicialmente o desenvolvimento e a função do cloroplasto (MACHOLD; STEPHAN, 1968).

A absorção deste nutriente pode ser afetada com o excesso de calagem que eleva o pH do solo (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002). A deficiência pode ocorrer por efeito de má drenagem, excesso de matéria orgânica (MATIELLO et al., 2002) e, em solos com pH muito ácido, o teor de Mn pode ficar muito alto, dificultando a absorção do Fe (MALAVOLTA, 1986). No *C. canephora* o Fe foi o micronutriente que mais acumulou na planta. O acúmulo maior foi nas raízes afirmando que este total não seria uma necessidade fisiológica da planta, mas uma deposição no apoplasto das células radiculares (BRAGANÇA, 2005).

3.2.3.2. Manganês (Mn)

O Mn é demandado para a atividade de algumas desidrogenases, descarboxilases, quinases, oxidases e peroxidases, atua na quebra da água no processo fotossintético, como ativador de muitas enzimas, e está envolvido em processos de oxidação e redução no sistema de transporte de elétrons (TAIZ; ZIEGER, 2004). A deficiência é provocada por excesso de calagem e falta d'água, e ocorre, principalmente, em solos arenosos (MATIELLO et al., 2002).

Em geral é mais prejudicial a sua toxidez, que está associada a solos ácidos, onde, há redução do tamanho das folhas e pequenas pontuações cloróticas nas mesmas, com um decréscimo na produtividade, pode também ocorrer amarelecimento e queda das folhas mais velhas, morte dos ramos e queda de frutos, podendo levar a planta à morte (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002). O Mn é o segundo micronutriente mais acumulado nas plantas de *C. canephora*, concentrando a maior parte do nutriente nas folhas (BRAGANÇA, 2005).

3.2.3.3. Boro (B)

O B está diretamente relacionado ao crescimento meristemático, ao alongamento celular, à biossíntese da parede celular, ao funcionamento da membrana celular, ao transporte de auxinas (AIA), ao metabolismo de carboidrato e à síntese de ácidos nucléicos (TARIQ; MOTT, 2007). Influi no crescimento do cafeeiro, participando da divisão celular, do crescimento de células e da parede celular (MATIELLO et al., 2002) e é importante na formação do tubo polínico, sendo fundamental para fecundação da flor (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002).

Devido à alta exigência de B por parte das regiões em crescimento intenso, é comum a morte das gemas terminais, quando este se encontra deficiente (MALAVOLTA, 1986). A deficiência pode acontecer por falta de Ca (diminui a absorção de B) e excesso de calagem e de N (MALAVOLTA, 1986). O excesso de B causa toxidez, ficando as folhas manchadas de verde/amarelo e em casos severos ocorrem queima nos bordos das folhas (MATIELLO et al., 2002), pode ocorrer também morte das raízes (MALAVOLTA; FERNADEZ; ROMERO, 1993). O B no *C. canephora* acumulou na maior parte nas folhas (BRAGANÇA, 2005).

3.2.3.4. Zinco (Zn)

O Zn atua no controle da expressão de gênica e integridade da membrana (TAIZ; ZIEGER, 2004), na regulação da absorção do fósforo (MARSCHNER, 1995). É catalizador na reação de formação do triptofano, e é precursor do ácido indolacético (TAIZ; ZIEGER, 2004), hormônio que é responsável pelo crescimento meristemático, afetando diretamente no crescimento da parte aérea do cafeeiro (MATIELLO et al., 2002). Em sistemas biológicos, o Zn é o único metal que está presente em todas as seis classes de enzimas que incluem as oxidoredutases, transferases, hidrolases, liases, isomerases e ligases (ALLOWAY, 2004). Nessas enzimas, foram identificados quatro tipos de funções de ligação: (i) catalítica, (ii) estrutural, (iii) co-catalisador, e (iv) de interface de proteínas que determinam a atividade biológica das enzimas.

O Zn controla a atividade da enzima RNase que hidrolisa o RNA, causando a diminuição da síntese proteica, atuando na multiplicação celular. Há clara correlação inversa entre o fornecimento de Zn e a atividade da RNase e também entre a atividade da RNase e o conteúdo de proteínas e o crescimento da planta (MARSCHNER, 1995). Nova classe de proteínas dependentes de Zn foi relatada, as quais estão envolvidas o DNA replicação, a transcrição e,

assim, a regulação da expressão do gene (COLEMAN, 1998; VALLEE; FALCHUK, 1993; ANDREINI; BERTINI; ROSATO, 2009).

Lima Filho (1991) observou grande interação entre os elementos Zn e B ao aplicá-los em plantas de cafeeiro, onde constatou que o aumento no teor de matéria seca ocorria com o aumento das doses de Zn apenas quando se elevava o teor de B no solo. Os internódios foliares na extremidade dos ramos ficam curtos com a deficiência de Zn, pode ocorrer morte dos ramos e as brotações formam rosetas, ficando as plantas com frutos pequenos e esta deficiência é induzida por calagem excessiva, alto teor de Mg, N, Cu e P. No *C. canephora* o Zn acumulou a maior parte nas raízes (BRAGANÇA, 2005).

3.2.3.5. Cobre (Cu)

O Cu é componente do ácido ascórbico oxidase, tirosinase, monoamina oxidase, uricase, citocromo oxidase, fenolase, lacase e plastocianina, atua como catalisador nos processos de respiração e de oxidação, além disso, participa do metabolismo de proteínas e carboidratos, atua na transferência de elétrons, síntese de plastoquinona e lignina e na formação e fertilização do pólen (TAIZ; ZIEGER, 2004).

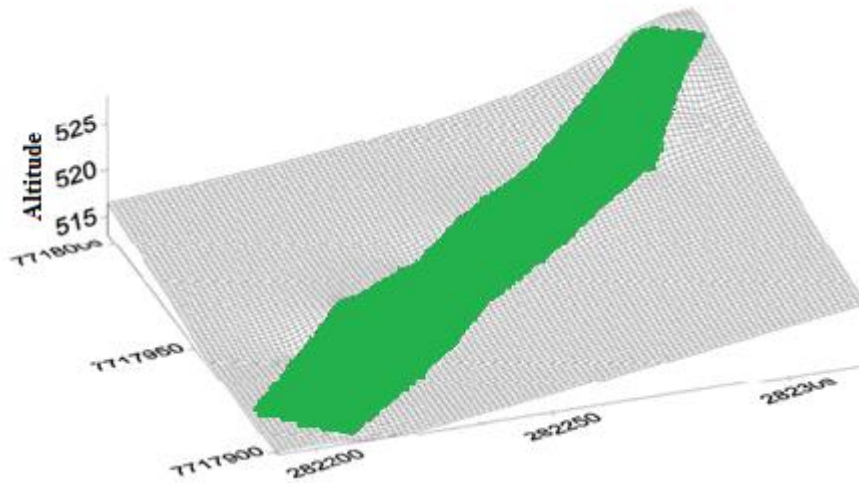
A deficiência pode ser induzida pelo excesso de matéria orgânica, adubação fosfatada pesada, encharcamento do solo, calagem excessiva, excesso de N na adubação (GUIMARÃES; MENDES; SOUZA, 2002), excesso de íons Fesos e a sua deficiência pode levar também à morte de raízes (MATIELLO et al., 2002).

O excesso geralmente ocorre devido a várias pulverizações à base de Cu para o controle de ferrugem. A toxidez causa pouco desenvolvimento e morte de raízes (MALAVOLTA FERNADEZ; ROMERO, 1993). Segundo Bragança (2005), o percentual acumulado do Cu concentrou-se no tronco com os ramos ortotrópicos e nas folhas.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização do experimento

A área do estudo está localizada no município de Cachoeiro de Itapemirim, no estado do Espírito Santo, em uma propriedade situada na comunidade Boa Vista, Distrito de São Vicente (20°37'31" de latitude sul e 41°05'22" longitude oeste), com altitude média de 520 metros (Figura 1). A região possui categorização Cwa, segundo a classificação climática de Köppen e Geiger (1928). A lavoura é um plantio comercial de *Coffea canephora* Pierre ex Froehner, e está implantada sobre um Cambissolo de textura argilo-arenosa com 450 g.kg⁻¹ de areia total; 90 g.kg⁻¹ de silte; e 460 g.kg⁻¹ de argila.



Fonte: Fonseca (2018)

Figura 1. Modelo de elevação da área de estudo.

4.2. Caracterização da lavoura e amostragem

A lavoura foi implantada por propagação seminal, adotando o espaçamento de 1,5 x 1,5 m (4.444 plantas por hectare). Os tratos culturais e fitossanitários foram realizados de acordo com Ferrão et al. (2007), e a aplicação de corretivos e adubos químicos foram realizados de acordo com a recomendação de Prezotti et al. (2007) com base na interpretação da análise química do solo.

Na área de estudo foram demarcados 80 pontos amostrais, os quais formam uma grade irregular e cada ponto possui área de 6,75 m², abrangendo três plantas de cafeeiro. Os pontos foram

identificados com marcador de metal numerado e o levantamento topográfico foi realizado por meio de uma estação total, conforme descrito em Fonseca (2018).

Para compor a amostra da qual foram determinados os teores foliares dos nutrientes, as folhas foram retiradas em cada um dos quatro quadrantes, das três plantas no ponto amostral, na quantidade de um par de folhas do ramo plagiotrópico localizado no terço médio da planta, sendo esse o terceiro par de folhas contados do ápice para a base do ramo (PREZOTTI; BRAGANÇA, 1995; ANDRADE, 2001). As folhas foram coletadas no mês de maio/2018, estágio de maturação dos frutos, com a finalidade de avaliação da metodologia fuzzy no estado nutricional, após desenvolvimento do fruto que é um dreno, e não para corrigir o manejo em eventuais deficiências que poderiam afetar a produção.

As amostras foram enviadas para laboratório particular, credenciado pelo Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que realizou as análises da matéria seca das folhas, segundo o Manual de Métodos e Análises (DONAGEMA et al., 2011), a fim de determinar as concentrações nos tecidos foliares dos macronutrientes: Nitrogênio (N), Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S); e dos micronutrientes Ferro (Fe), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Boro (B) e Cobre (Cu).

4.3. Análise dos dados observados

Uma análise exploratória foi realizada para identificar a presença de *outliers* no conjunto de dados utilizando box-plot. Identificados, os *outliers* foram retirados do conjunto de dados para não influenciarem a análise descritiva das medidas de posição e dispersão. Na sequência testou-se a normalidade dos dados pelo teste Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$) e, posteriormente, a correlação de Pearson (r) ($p < 0,05$) entre os nutrientes, visando detectar inter-relações existentes.

Os dados observados para cada nutriente, antes da classificação fuzzy, foram utilizados para a construção dos seus respectivos mapas (IDW), apresentando as três faixas de suficiência (FS) nutricional que são definidas pelos limites inferiores (LI) e superiores (LS), representando as classes: Baixo, Adequado e Alto, na escala métrica usual.

4.4. Interpretação do estado nutricional

4.4.1. Faixa de suficiência (FS) e nível crítico (NC)

Os valores de referências utilizados para a interpretação do estado nutricional estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Faixas de suficiência (FS) e do Nível crítico (NC) dos nutrientes para interpretação da análise foliar na cultura do *C. canephora*

Nutrientes	Classe de interpretação	
	FS	NC
Macronutrientes (dag kg ⁻¹)		
N	2,90 - 3,20	3,00
Ca	1,00 - 1,50	1,40
K	2,00 - 2,50	2,10
Mg	0,35 - 0,40	0,32
S	0,20 - 0,25	0,24
P	0,12 - 0,16	0,12
Micronutrientes (mg kg ⁻¹)		
Fe	120 - 150	131
Mn	60 - 80	69
B	50 - 60	48
Zn	10 - 15	12
Cu	10 - 20	11

Fonte: Bragança, Prezotti e Lani (2007)

4.4.2. Sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS)

O DRIS utiliza as relações entre as concentrações dos macros e dos micronutrientes foliares e padroniza estas relações com base em valores de referência, para lavoura de alta produtividade.

Os valores de referência para a lavoura do cafeeiro conilon foram os levantados e presentes em Partelli et al. (2016). As relações dois a dois entre os nutrientes foram definidas com amostragens realizadas utilizando a variedade Vitória Incaper 8142, no período de inverno na região norte do Espírito Santo, devido à ausência de valores de referência para o sul do estado.

O diagnóstico nutricional na lavoura foi obtido, segundo definição de Jones (1981), pela equação 1.

$$f(A/B) = (A/B - a/b)/s_{(a/b)} \quad \text{eq. 1}$$

em que: A/B representa o valor da relação entre as concentrações de dois nutrientes da planta diagnosticada e, a/b e $s_{(a/b)}$, respectivamente, a média e o desvio padrão de cada relação da população de referência.

O índice DRIS, seguindo as recomendações de Alvarez e Leite (1992), para o nutriente A foi então determinado pela equação 2.

$$IA = \left[\sum (f(A/B_i - a/b_i)/s_{i(a/b)}) - \sum f(B/A_i - b/a_i)/s_{i(b/a)} \right] / n+m \quad \text{eq. 2}$$

em que: IA é índice DRIS para o nutriente A para i variando de 1 até n, e n corresponde ao número de funções onde o nutriente A aparece no numerador e m corresponde ao número de funções que A aparece no denominador.

Do cálculo do DRIS se obtém o índice de balanço nutricional (IBN) que é dado pela soma dos módulos dos índices para cada nutriente (equação 3) do número de Z nutrientes estudados.

$$IBN = |\text{índice de A}| + |\text{índice de B}| + \dots + |\text{índice de Z}| \quad \text{eq. 3}$$

O IBNm (médio) para cada ponto da malha amostral foi determinado dividindo-se o IBN pontual pelo número de nutrientes avaliados na análise foliar, conforme utilizado por Fonseca et al. (2015) e Partelli et al. (2016).

4.5. Classificação fuzzy

A interpretação da análise foliar do *C. canephora*, usualmente, é feita segundo classificação Booleana, ou seja, o valor da concentração encontrado na análise laboratorial para um determinado nutriente só pode estar dentro ou fora da faixa de FS e, também, acima e/ou abaixo do nível crítico (NC). Sendo assim, decidiu-se utilizar a classificação fuzzy (CF) que é um método matemático que determina o grau de pertinência (GP) do valor encontrado para cada nutriente dentro de limites preestabelecidos. Este método visa resolver problemas onde a informação não está bem definida e baseia-se na modelagem do problema, traduzindo em

termos matemáticos as informações imprecisas contidas na linguagem natural expressa por variáveis linguísticas que podem ser transformadas (LIMA et al., 2016; SENTÜRK, 2017).

Na CF determinou-se o GP de cada valor pontual para cada nutriente foliar (macros e micronutrientes) nas faixas de suficiência (FS): Baixo, Adequado e Alto e padronizou em índices fuzzy numa escala variando de 0 a 10. Esta transformação foi realizada para informar em mapas a distribuição espacial dos nutrientes numa mesma escala métrica, com os mesmos valores do índice fuzzy para os limites inferiores e superiores.

O método de inferência utilizado foi o Mamdani, que utiliza os operadores de máximo para a operação de união (“ou”) das regras, e os operadores de mínimo para a operação de intersecção (“e”) entre os conjuntos (SANTOS; BENICASA, 2012). As variáveis de entrada (INPUT) foram os nutrientes, como mostra o fluxograma apresentado na Figura 2. As faixas de suficiência (FS) foram transformadas em variáveis linguísticas e analisadas pelos modelos matemáticos: triangular para os conjuntos Baixo (BA) e Alto (AL) e o modelo trapezoidal para o conjunto Adequado (AD). O modelo trapezoidal foi adotado para o conjunto AD, uma vez que ela é definida pelo limite inferior (LI) e o limite superior (LS), limitando, assim, a FS.

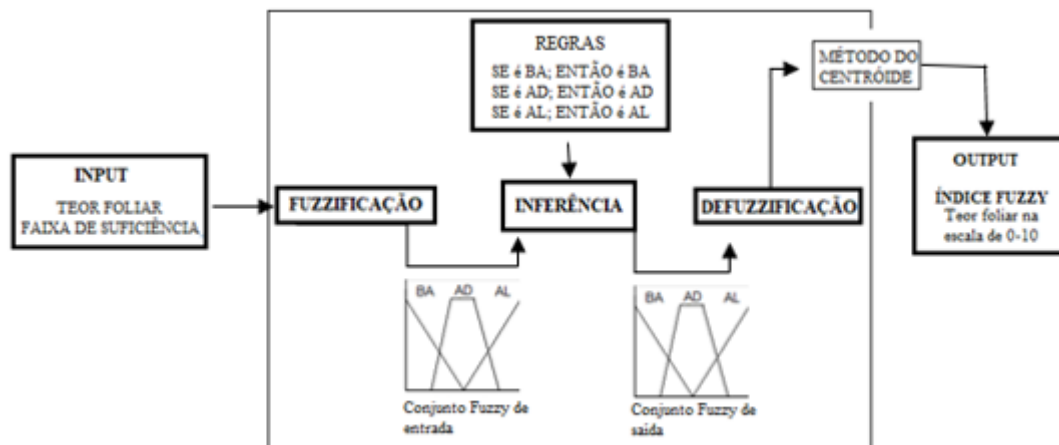


Figura 2. Fluxograma da modelagem fuzzy.

A defuzzificação dos dados observados, para os teores dos nutrientes em cada ponto amostral, se estabeleceu regras de inferências, que envolvem funções matemáticas que definem o grau de pertinência de um elemento a um conjunto fuzzy. Os valores pontuais dos nutrientes foram transformados em graus de pertinências (GP) assumindo respectivos índices fuzzy. As regras

de inferências para a defuzzificação foram definidas utilizando os conectivos lógicos SE (IF) e ENTÃO (THEN), utilizando os recursos do *software* MATLAB.

O método utilizado na defuzzificação da modelagem, após estabelecimento das regras, foi o do centróide, que consiste na discretização da saída fuzzy a partir da definição da média aritmética entre os centros de gravidade dos conjuntos fuzzy estabelecidos pela interceptação dos modelos matemáticos utilizados para as variáveis linguísticas. A pertinência de um dado elemento a um conjunto é estabelecida ponderando-se os graus de pertinência dos elementos aos diferentes conjuntos.

A Figura 3 exemplifica para o Cu o valor observado de 23 mg kg^{-1} , acima do limite superior de 20 mg kg^{-1} , interceptando as curvas (conjuntos) AD e AL, definindo as figuras geométricas no *OUTPUT*.

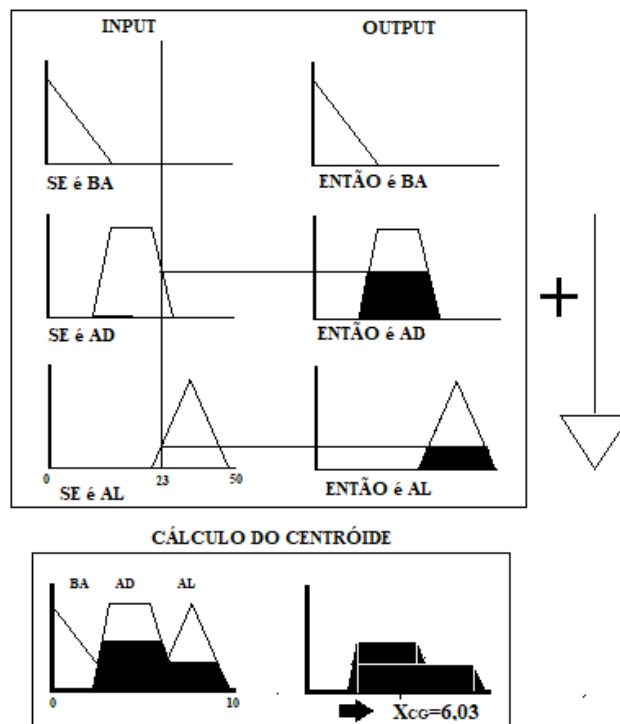


Figura 3. Exemplificação do método do centróide para determinação do grau de pertinência (GP) (índice fuzzy).

Uma vez definidas, as figuras formadas são divididas em figuras menores em formatos triangular e/ou retangular, definindo suas áreas e as respectivas coordenadas dos seus centros de gravidades (CG). Para o retângulo e o triângulo as coordenadas do centro de gravidade são:

$X = B/2$ e $Y = H/2$ e $X = B/3$ e $Y = H/3$, respectivamente, sendo $B =$ base e $H =$ altura. Feito isto, determina-se o centro de gravidade (CG) da figura total, obtendo as coordenadas Y_{CG} e X_{CG} , conforme equações 4 e 5.

$$Y_{CG} = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{eq. 4}$$

$$X_{CG} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i * A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad \text{eq. 5}$$

em que: Y_{CG} e X_{CG} : coordenadas do centro de gravidade da figura total; Y_i : coordenada do centro de gravidade para cada figura geométrica considerando a altura; X_i : coordenada do centro de gravidade para cada figura geométrica considerando a base; e A_i : área de cada figura.

Como exemplo, o valor de X_{CG} é, portanto, o valor encontrado para o valor de entrada de 23 mg kg⁻¹ do Cu definindo o valor de saída de 6,03 para o grau de pertinência (GP) na escala fuzzy adotada para defuzzificação.

4.5.1. Modelagem fuzzy

4.5.1.1. Entrada (INPUT)

Os intervalos definidos na modelagem para cada variável linguística e para cada nutriente foliar estão apresentados na Tabela 2. Na modelagem da faixa de suficiência adequada (AD) usou o modelo trapezoidal em função da existência de limite inferior (LI) e superior (LS), para cada nutriente. Os intervalos do modelo triangular para as faixas de baixa (BA) e de alta (AL) suficiência foram ajustados na sequência. Para cada valor de LI e de LS no INPUT, para cada nutriente, buscou-se encontrar valores constantes, ou bem próximos, de graus de pertinências (GP) fuzzy. Verifica-se que os intervalos variaram em cada nutriente devido à variação de grandeza e da escala métrica, como mencionado anteriormente.

Na análise da produtividade (Prod) foram considerado os mesmos modelos e três faixas como usados para os nutrientes foliares. O limite inferior (LI) e o superior (LS) para o modelo trapezoidal, para a faixa adequado (AD) da produtividade, foram delimitados de forma a aproximar dos graus de pertinências dos limites inferiores (LI) e superiores (LS) dos macros e dos micronutrientes após a defuzzificação. Assim, partiu-se dos limites fuzzy (graus de

pertinência) definidos anteriormente para os nutrientes foliares na determinação dos limites em sc/ha.

Tabela 2. Intervalos definidos na modelagem para cada variável linguística e para cada nutriente foliar

Faixas dos INPUT's para as variáveis linguísticas			
	BA	AD	AL
Modelos matemáticos			
	Triangular	Trapezoidal	Triangular
Macronutrientes			
N	[-1,5; 1,75; 3,0]	[1,75; 2,9; 3,2; 4,0]	[3,05; 4,0; 6,0]
Ca	[-1,5; 0,0; 1,25]	[0,5; 1,0; 1,5; 2,0]	[1,25; 3,0; 4,0]
K	[-2,0; 0,5; 2,25]	[1,5; 2,0; 2,5; 3,0]	[2,25; 3,5; 4,0]
Mg	[-0,2; 0,1; 0,375]	[0,25; 0,35; 0,40; 0,50]	[0,375; 0,6; 0,8]
S	[-0,05; 0,1; 0,225]	[0,15; 0,2; 0,25; 0,30]	[0,225; 0,4; 0,6]
P	[0,0; 0,0; 0,14]	[0,05; 0,12; 0,16; 0,18]	[0,14; 0,25; 0,4]
Micronutrientes			
Fe	[20,0; 80,0; 135,0]	[110,0; 120,0; 150,0; 160,0]	[135,0; 250,0; 500,0]
Mn	[-60,0; 40,0; 70,0]	[50,0; 60,0; 80,0; 90,0]	[70,0; 220,0; 320,0]
B	[-10,0; 30,0; 55,0]	[40,0; 50,0; 60,0; 70,0]	[55,0; 110,0; 160,0]
Zn	[-2,0; 5,0; 12,5]	[5; 10,0; 15,0; 30,0]	[12,5; 30,0; 40,0]
Cu	[-20,0; 0,0; 15,0]	[5,0; 10,0; 20,0; 25,0]	[15,0; 40,0; 50,0]
Produtividade			
	[-10; 10; 100,7]	[0,0; 88,0; 118,0; 200,0]	[100,7; 210,0; 220,0]

BA: Baixo; AD: Adequado e AL: Alto.

4.5.1.2. Regras de inferência

As regras de inferência para a defuzzificação dos resultados da análise do estado nutricional e da produtividade da lavoura estão apresentadas na Tabela 3.

Nesta etapa considerou-se que os resultados observados dos atributos distribuídos nas três faixas de suficiência (Baixo, Adequado e Alto) correspondem às classes das respectivas variáveis linguísticas (Baixo, Adequado e Alto) na defuzzificação.

Tabela 3. Regras de inferência para a defuzzificação dos dados de entrada (*INPUT*) para cada nutriente foliar

Regras	Nutriente (<i>INPUT</i>)	Saída (<i>OUTPUT</i>)
1	SE é BA	ENTÃO é BA
2	SE é AD	ENTÃO é AD
3	SE é AL	ENTÃO é AL

BA: baixo; AD: adequado e AL: alto.

4.5.1.3. Saída (OUTPUT)

A variável de saída (OUTPUT), índice fuzzy (IF = GP), foi definida com a modelagem matemática triangular para as variáveis linguísticas de BA e AL e trapezoidal para AD, conforme Figura 2.

Como cada variável linguística é definida na modelagem em intervalos para cada classe, esses intervalos assumiram valores iguais em todos os diferentes nutrientes e a produtividade, sendo: [-1,0; 0,0; 5,0] para Baixo (triangular); [2,0; 4,0; 6,0; 8,0] para adequado (trapezoidal) e [5,0; 10,0; 15,0] para Alto (triangular), padronizando os dados laboratoriais.

Esta padronização facilitou a apresentação em mapas da distribuição espacial do estado nutricional nas três faixas de concentração (FS) para cada nutriente foliar, permitindo determinar o mapa médio e o percentual da área experimental ocupada em cada faixa de suficiência (FS).

4.6. Método de Interpolação

A distribuição espacial do estado nutricional da lavoura do *C. canephora* na área experimental, segundo classificação fuzzy (CF) e com os dados originais a partir dos oitenta pontos amostrais, foi determinada pelo método de interpolação inverso do quadrado da distância (IDW), conforme equação 6.

$$X_{IDW} = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2}\right) * X_i}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{d_i^2}\right)} \quad \text{eq. 6}$$

em que: X_{IDW} : valor estimado para cada nutriente defuzzificado e para os dados normais, em locais não medidos; e d : distância euclidiana entre o i -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado.

Os arquivos dos mapas foram gerados no *software* GS⁺ (1998) e os mapas foram construídos no *Surfer* 10, dividindo-os em três classes: a primeira, valores abaixo do limite inferior (LI); a segunda, valores entre o limite inferior (LI) e o superior (LS); e a terceira, valores acima do limite superior (LS) da faixa de suficiência (FS).

4.7. Mapa nutricional médio

Com os mapas individuais construídos para os macronutrientes e os micronutrientes, foram determinados os mapas médios, que consistiram na soma algébrica dos mapas na escala fuzzy e dividido pelo número de mapas somados, definindo-se, assim, o mapa médio dos macronutrientes (MMacro) e dos micronutrientes (MMicro) do estado nutricional do *C. canephora*.

A lógica fuzzy foi utilizada para a descrição do estado nutricional médio da lavoura, em mesma escala, a partir da relação linear entre os nutrientes, ou seja, os macros e os micronutrientes em seus respectivos mapas foram considerados com contribuição igualitária no estado nutricional da lavoura.

4.8. Comparação entre os mapas originais e defuzzificados

Os dados originais e defuzzificados e, também, os mapas temáticos foram transformados pela estatística Z, conforme equação 7, que padroniza os dados para que as diferentes unidades de medida não afetassem os cálculos. Nos casos dos mapas, fez-se a transformação por álgebra de mapas.

$$Z = \frac{(\text{Mapa-média})}{S} \quad \text{eq. 7}$$

em que S: desvio padrão do conjunto de dados.

Após a transformação dos dados determinou-se o coeficiente de correlação de Pearson (r) ($p < 0,05$) (equação 8), que mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas, o índice de concordância (d) (WILLMOTT, 1981) (equação 9) e o índice de confiança (c) (CAMARGO e SENTELHAS, 1997), entre os dados de entrada (originais) e os da saída fuzzy e, também, entre os mapas originais e os defuzzificados construídos por IDW.

$$r_{L,F} = \frac{1}{n-1} \sum \frac{(x_i - M_x)}{S_x} \frac{(y_i - M_y)}{S_y} \quad \text{eq. 8}$$

em que: r_L : coeficiente de correlação entre os dados de entrada e os da saída fuzzy, r_F : coeficiente de correlação entre os mapas com dados originais e os da saída fuzzy, x_i e y_i : valor

do nutriente no mesmo ponto amostral entre entrada (x) e saída (y) e nos mapas (x e y); n = número de pontos amostrais em cada mapa (2683) e S_x e S_y = desvio padrão dos dados de entrada e de saída e dos valores dos mapas interpolados.

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^{nd} (M_i - R_0)^2}{\sum_{i=1}^{nd} (|M_i - med_0| + |R_0 - med_0|)^2} \right] \quad \text{eq. 9}$$

em que: d = índice de concordância; M_i = mapa do nutriente (original); nd = número de pares analisados; R_0 = mapa do nutriente defuzzificado; e med_0 = média do mapa original do nutriente.

Willmott (1982) ressalta que índices que variam dentro de limites bem definidos são mais úteis para comparação entre diferentes métodos e para comparações entre diferentes simulações de uma mesma situação.

A porcentagem de área (PA) em cada classe de suficiência também foi determinada, visando semelhança visual entre os mapas construídos com os dados originais e os construídos após defuzzificação, utilizou-se para os cálculos o *software Surfer 10*.

4.9. Análise do DRIS e da Produtividade

O DRIS foi determinado em cada ponto amostral para definir a ordem de limitação nutricional e, também, determinou-se o índice de balanço nutricional médio (IBNm) para verificar existência de relação com a produtividade. Assim, determinou-se a correlações linear de Pearson ($p < 0,05$) entre os índices DRIS de cada nutriente com o IBSm e a produtividade da área. O mapa da IBSm foi construído por IDW (equação 6) e analisado comparativamente com os construídos para os dados foliares.

A distribuição espacial da produtividade da lavoura foi representada em mapas, construídos pelo método IDW, para os dados originais (sc/ha) e para os dados após a classificação fuzzy.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Análise descritiva

Análise descritiva dos macros e micronutrientes foliares do *C. canephora* está apresentada na Tabela 4, após exclusão dos *outliers* para o N, Fe e o Mn. Os nutrientes apresentaram assimetria à direita, com média maior que a mediana. Os nutrientes N, K, Fe, Mn e Zn apresentaram distribuição platicúrtica, com afastamento em relação ao valor médio. Somente os nutrientes P, Fe e Cu não apresentaram distribuição normal pelo teste Kolmogorov-Smirnov ($p < 0,05$). Isto reflete nas análises que são realizadas com a média da população, como a interpretação do estado nutricional por FS e DRIS.

Os coeficientes de variação (CV), segundo classificação de Warrick e Nielsen (1980), foram médios ($12\% < CV < 60\%$) para todos os nutrientes foliares. Oliveira et al. (2010) encontraram $CV < 12\%$ para o N, K e B e os demais na faixa de média variação, para lavoura na faixa de 60 sc.ha⁻¹. Fonseca et al. (2015) e Partelli et al. (2016) encontraram $CV < 12\%$ para o N e média variação para os demais nutrientes, para lavoura de 60 sc.ha⁻¹ e mais de 100 sc.ha⁻¹, respectivamente. O maior CV (39,99%) encontrado foi para a produtividade do café em sc.ha⁻¹, em decorrência da alta amplitude entre os dados.

Tabela 4. Análise descritiva dos macronutrientes (dag.kg⁻¹) e dos micronutrientes (mg.kg⁻¹) foliares do café conilon.

	M	Md	Min	Max	S	Ks	Kc	CV%	DN
Macronutrientes									
N	2,40	2,38	1,75	3,08	0,29	0,29	-0,25	12,07	ns
Ca	1,71	1,68	1,07	2,61	0,33	0,78	0,60	19,39	ns
K	1,25	1,29	0,53	2,66	0,48	0,45	-0,07	37,94	ns
Mg	0,33	0,31	0,19	0,59	0,09	0,82	0,03	28,69	ns
S	0,21	0,21	0,18	0,31	0,03	1,26	1,51	14,02	ns
P	0,18	0,18	0,11	0,26	0,03	0,13	-0,13	17,18	*
Micronutrientes									
Fe	125,99	124,50	80,00	250,00	31,46	2,27	7,24	24,97	*
Mn	132,89	122,50	55,00	220,00	46,08	0,58	-0,57	34,68	ns
B	82,74	81,62	28,88	114,84	15,80	-0,24	0,51	19,10	ns
Zn	22,26	21,98	15,65	32,15	3,87	0,28	-0,26	17,37	ns
Cu	18,99	18,10	8,80	38,80	5,66	1,02	2,17	29,81	*
Prod	100,69	93,93	12,84	204,97	40,26	0,52	0,17	39,99	ns

M: média; Md: mediana; Min: valor mínimo; Max: valor máximo; S: desvio padrão; Ks: coeficiente de assimetria; Kc: coeficiente de curtose; CV: coeficiente de variação; Prod: produtividade (sc.ha⁻¹); ns: distribuição normal pelo teste Kolmogorov-Smirnov (KS) em 5% de probabilidade; e * distribuição não normal

5.2. Interpretação nutricional

Considerando os valores de referência apresentados na Tabela 1 para o *C. canephora* verifica-se para os macronutrientes que somente o S está dentro da faixa adequada de suficiência. O N, K e o Mg apresentam valores médios na faixa de baixa suficiência e na faixa de alta suficiência estão o Ca e o P. Fonseca et al. (2015) determinaram para o N, K, Mg e S na faixa de baixa suficiência e o Ca e o P na faixa adequada, após a colheita.

Para Partelli et al. (2016), a concentração dos macronutrientes nos tecidos foliares variam de acordo com o estágio fenológico que a lavoura se encontra, da temperatura ambiente, da época da amostragem e do período de maturação dos frutos, sugerindo que os padrões foliares podem apresentar oscilações em função da demanda dos frutos e da translocação dos nutrientes das folhas para os frutos.

O Ca possui baixa taxa de redistribuição na planta devido a sua baixa concentração no floema. Seu transporte é devido à transpiração de folhas e frutos, assim a necessidade do nutriente pelos frutos não altera os teores foliares de folhas maduras como as utilizadas para análise, e por possuírem maiores taxas de transpiração recebem o Ca em caso de deficiência do nutriente no solo (FAQUIN, 2005).

Oliveira et al. (2010) afirmaram que nutrientes foliares abaixo da faixa adequada pode estar relacionado com fatores como baixa concentração no solo pela origem e cultivos sucessivos, sendo adicionados em baixa concentração ou não aplicados. O N e o K na baixa suficiência possivelmente foram translocados para o fruto, conforme resultados encontrados por Laviola et al. (2008), os acúmulos do N nos frutos são significativos nos estágios de expansão rápida e granação/maturação, e o K é translocado para os frutos até a maturação, pois é requerido na ativação de enzimas na síntese de compostos produzidos com a maturação.

Oliveira et al. (2010) e Fonseca et al. (2015) encontraram a concentração média na faixa adequada de suficiência para o P ($0,15 \text{ dag.kg}^{-1}$) na lavoura *C. canephora*, sendo do presente estudo se encontra na faixa de alta concentração. De acordo com Fonseca et al. (2015), a baixa exigência do P no desenvolvimento fisiológico está relacionada, possivelmente, com a adubação fosfatada realizada na área.

O Mg fornecido através da calagem deve ser realizada com cuidado para que os teores de Ca não afetem a absorção do Mg, pois suas propriedades químicas são semelhantes e podem competir por sítios de absorção das raízes, como também sítios de adsorção no solo (ORLANDO FILHO et al., 1996).

As concentrações dos nutrientes Fe e Cu se encontram na faixa adequada e o Mn, B e Zn estão com valores médios na faixa de alta concentração. Andrade et al. (2012) encontraram na lavoura de conilon valores médios dos teores na faixa adequada apenas para o Zn, Fe, e Mn estava com valor médio dos teores foliares na faixa de baixa suficiência e Cu e B estavam na faixa de alta suficiência. No estudo de Oliveira et al. (2010), somente o nutriente Cu apresentou valor médio na faixa de alta concentração. Ferrão et al. (2007) afirmam que o Fe é, normalmente, um nutriente limitante na produção em lavouras de conilon no Espírito Santo. Tomaz et al. (2009) afirmam que micronutrientes em níveis não adequados proporciona efeito no desenvolvimento e compromete a eficiência do uso dos fertilizantes contendo macronutrientes.

Segundo Prezotti et al. (2007), após a floração é realizado pulverizações espaçadas com micronutrientes para correções dos teores, mas com porcentagens dos nutrientes definidas, o que ocorreu na lavoura, o que pode ter contribuído para o teor do Cu na faixa adequada e para os teores de Mn, B e Zn na faixa de alta concentração.

5.3. Correlação entre nutrientes e a produtividade

As correlações de Pearson ($p < 0,05$) entre os nutrientes dos tecidos foliares (originais) estão apresentadas na Tabela 5. Conforme classificação de Dancey e Reidy (2006), sendo: 0,10 a 0,39 (fraco); 0,40 a 0,69 (médio) e de 0,70 a 1,00 (alto). Observa-se coeficientes de fraco a médio, com exceção para o Ca versus Mg ($r = 0,85$). Fonseca et al. (2015) encontraram Ca versus Mg com $r = 0,66$ (moderado). A correlação negativa e moderada ($r = -0,32$) da relação K versus Mn indica o antagonismo entre esses dois nutrientes, uma vez que, plantas com maiores concentrações de K possuíram menores concentrações de Mn, conforme relatado por Moore (1972), que o K em alta concentração reduz a absorção do Mn.

O P versus K apresentou $r = 0,48$ indicando que, apesar de o K juntamente com o N serem os mais limitantes e o P estar na faixa de alta concentração, tem regiões na área onde a concentração de um é alta a do outro também é. O K versus N apresentou $r = -0,25$ (baixo)

mostrando que onde o N se encontrar na área em menor concentração o K se encontra alto, mesmo esses nutrientes estando na faixa de baixa suficiência. Oliveira et al. (2010) também encontraram correlação negativa do K *versus* N ($r = -0,27$).

Ca *versus* Mg com $r = 0,85$ e Ca *versus* Mn com $r = 0,40$, sendo que Oliveira et al. (2010) encontram Ca *versus* Mn $r = -0,20$, indicando onde o Ca é baixo na planta o Mn está com alta concentração, que no presente estudo mostrou que quando um aumenta o outro também aumenta. O antagonismo do Ca e Mn era o esperado, conforme estudo por Parecido (2020), em que foi pesquisado o efeito do calcário e/ou gesso na nutrição e produtividade do café arábica, nos anos de 2016, 2017 e 2018 a absorção do Mn com os maiores teores do calcário foi afetada. O LS do Ca é de $1,50 \text{ dag kg}^{-1}$ e o valor médio da análise é de $1,71 \text{ dag kg}^{-1}$ e o LS para o Mn é de $80,0 \text{ mg kg}^{-1}$ para uma concentração média de $132,89 \text{ mg kg}^{-1}$.

A Prod *versus* Ca, Mg e Fe apresentaram correlações significativas e positivas com $r = 0,33$, $r = 0,41$ e $r = 0,33$, respectivamente, indicando que nas plantas com concentrações maiores destes a produtividade foi maior. Em plantas com alta produtividade indica que o nutriente K foi transportado para os frutos, como $r = -0,37$, deixando as plantas com baixa concentração do K. Fonseca et al. (2015) encontraram correlação significativa com a produtividade do café conilon somente com o Ca do tecido foliar.

Tabela 5. Correlação de Pearson ($p < 0,05$), significativa, entre os macros e micronutrientes dos tecidos foliares do café conilon

	N	Ca	K	Mg	S	P	Fe	Mn	B	Zn	Cu	Prod
N	1,00	ns	-0,25	Ns	ns	ns	ns	0,32	ns	ns	Ns	ns
Ca		1,00	Ns	0,85	ns	0,28	ns	0,40	ns	ns	Ns	0,33
K			1,00	Ns	ns	0,48	ns	-0,32	ns	ns	Ns	-0,37
Mg				1,00	ns	0,26	ns	0,40	ns	ns	Ns	0,41
S					1,00	0,23	ns	ns	ns	ns	Ns	ns
P						1,00	ns	ns	ns	0,23	0,36	ns
Fe							1,00	ns	ns	ns	0,50	ns
Mn								1,00	ns	ns	Ns	0,33
B									1,00	ns	Ns	ns
Zn										1,00	Ns	ns
Cu											1,00	ns
Prod												1,00

ns= não significativo a 5% de probabilidade na correlação de Pearson.

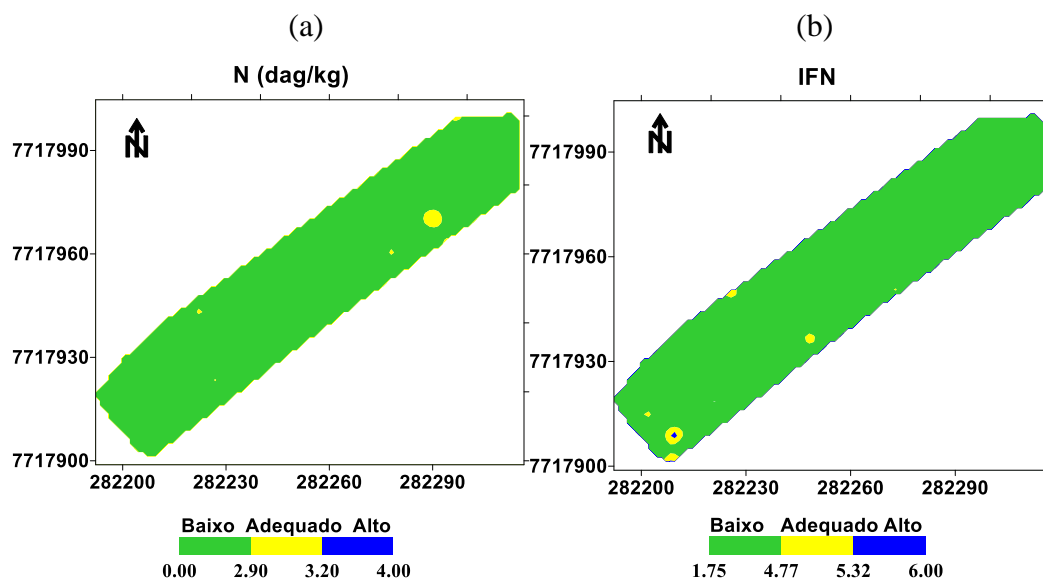
5.4. Análise da defuzzificação

5.4.1. Macronutrientes

Na classificação fuzzy, o valor do limite inferior (LI) e superior (LS) da classe adequada de suficiência para cada nutriente foi defuzzificado, assim como todos os demais valores. Para os macronutrientes, o valor médio do LI e LS foram de 4,69 e 5,35 e para os micronutrientes foram de 4,46 e 5,26, respectivamente. Nos respectivos mapas observa-se que os limites citados (defuzzificados) variam pouco entre os nutrientes. Esta pequena variação pode estar relacionada com a variação da amplitude da classe adequada (AD) entre os nutrientes e que na modelagem adotada não conseguiu o ajuste fino necessário, o que pode ser testado, em outra análise, com a utilização de outros valores de referências com amplitudes maiores.

Cabe destacar, que o valor de saída (OUTPUT) para cada valor de entrada corresponde à coordenada X_{CG} do centróide e, isto mostra, que a figura geométrica final para cada atributo apresentou pequena variação quanto a sua forma para cada LI e LS da faixa adequada.

Os mapas para os macronutrientes em escala normal e após defuzzificação estão apresentados nas Figuras de 4 a 6. Para o N e o K, os mapas estão na Figura 4, em que se verifica grande extensão da área na faixa de baixa suficiência (verde) e semelhança visual entre os mapas.



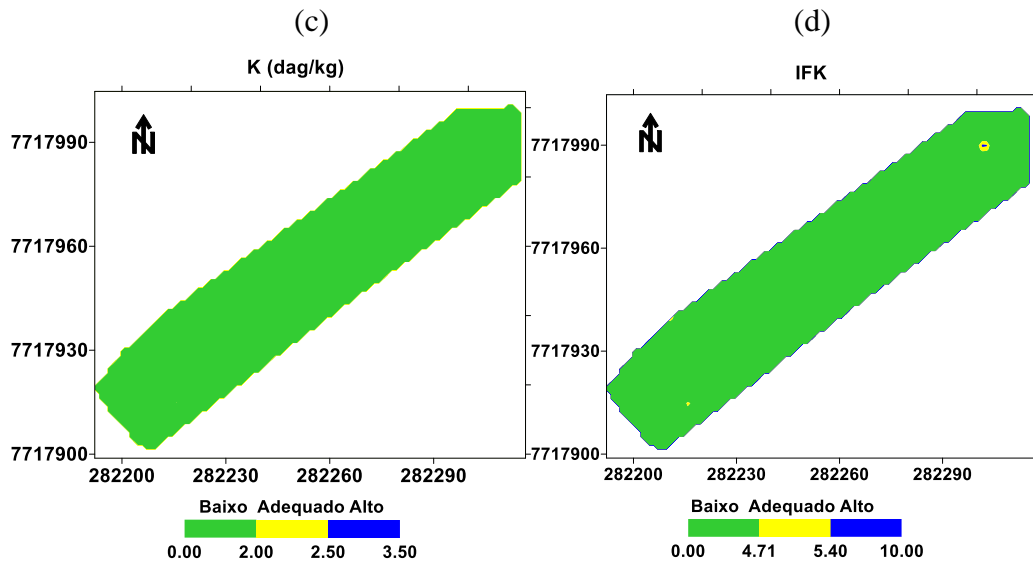


Figura 4. Distribuição espacial do N (a), IFN (b), K (c) e IFK (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS).

O N em escala normal não aparece em regiões com presença de plantas em concentrações maior que $3,20 \text{ dag.kg}^{-1}$ e o para o K é insignificante na faixa de alta suficiência (cor azul), com quase totalidade na faixa de baixa suficiência (cor verde). Apesar da grande ocorrência destes nutrientes na faixa de baixa suficiência eles apresentaram baixa correlação linear ($r = -0,25$) significativa ($p < 0,05$). Isto pode ocorrer por seus valores variarem com alta amplitude na faixa de baixa suficiência.

Os mapas da distribuição espacial para o Ca e o Mg estão na Figura 5, onde não se verifica plantas com baixa deficiência (cor verde) na área para o Ca. Os mapas para o Mg apresentam distribuição espacial similar nas três faixas de suficiências, com plantas na região central da área com concentrações na faixa de alta suficiência (cor azul).

O valor médio do Ca é de $1,71 \text{ dag kg}^{-1}$ e está compreendido na área de alta suficiência (cor azul), enquanto que a média do Mg é de $0,33 \text{ dag kg}^{-1}$, que é o valor do seu NC para o *C. canephora*, portanto, na faixa de baixa suficiência (cor verde). A correlação linear entre Ca versus Mg tem um $r = 0,85$, sendo que Fonseca et al. (2019b) não encontraram nas safras anteriores da mesma lavoura correlação significativa em 2015/2016, no entanto, para a safra de 2016/2017 a correlação foi 0,27. Bragança et al. (2005) apresentaram que a relação de Ca/Mg referência para o cálculo do DRIS é de 3,1:1 e o Mg/Ca é de 0,35:1. Na presente pesquisa, a relação Ca/Mg é de 5,2:1 e Mg/Ca é de 0,19:1, mostrando a alta concentração no tecido foliar

para o Ca. O Ca elevado pode ser em decorrência da calagem realizada na lavoura após safra anterior.

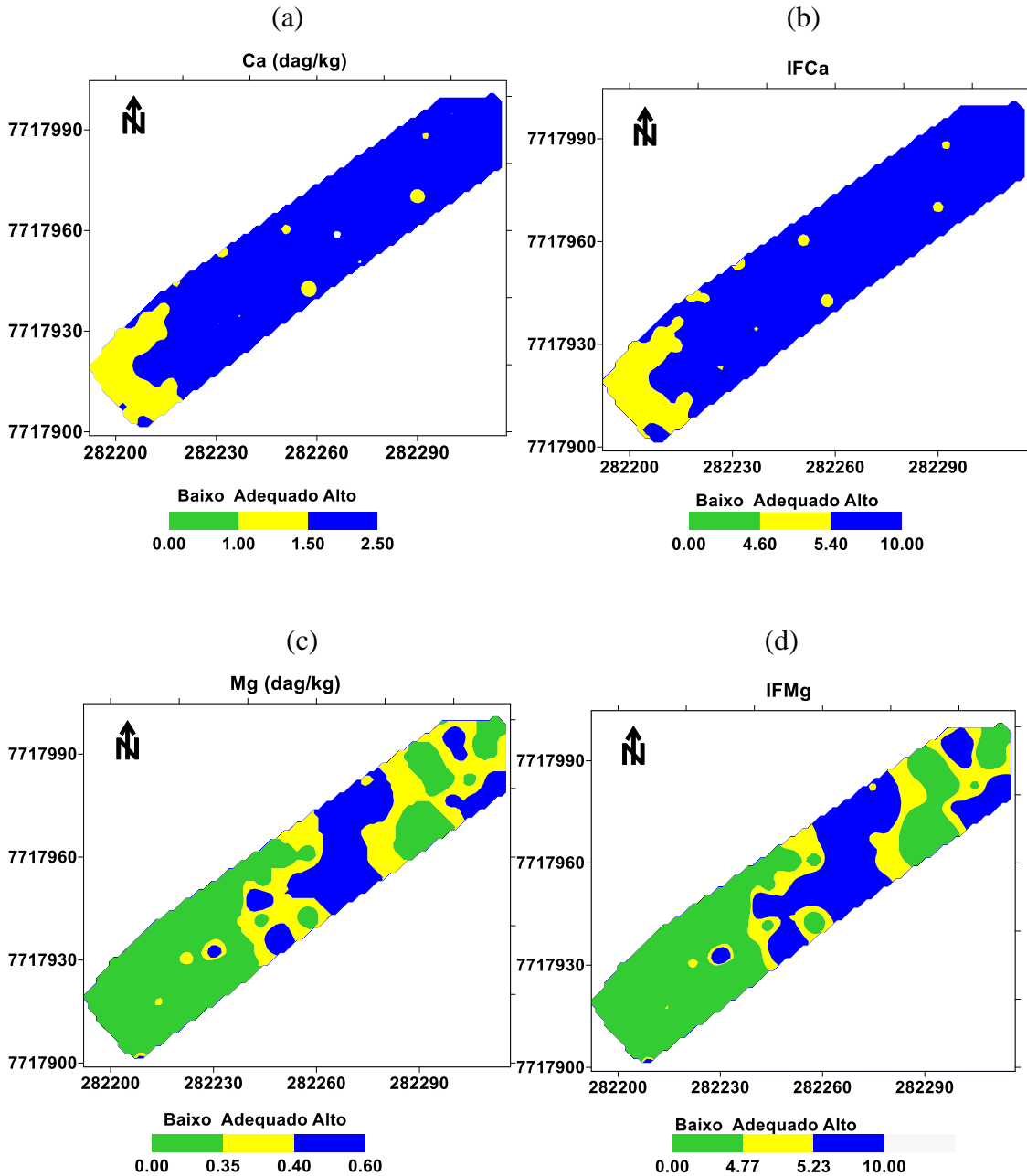


Figura 5. Distribuição espacial do Ca (a), IFCa (b), Mg (c) e IFMg (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS).

A distribuição espacial para o S e o P está apresentada na Figura 6 e, verifica-se na parte central da área para o mapa IFS (defuzzificado) aumento da área na faixa de baixa suficiência (cor verde). Os dados observados em campo apresentaram S *versus* P um $r = 0,23$ de correlação,

sendo que a distribuição do S está nas faixas de baixa e adequada e o P de adequada a alta na área.

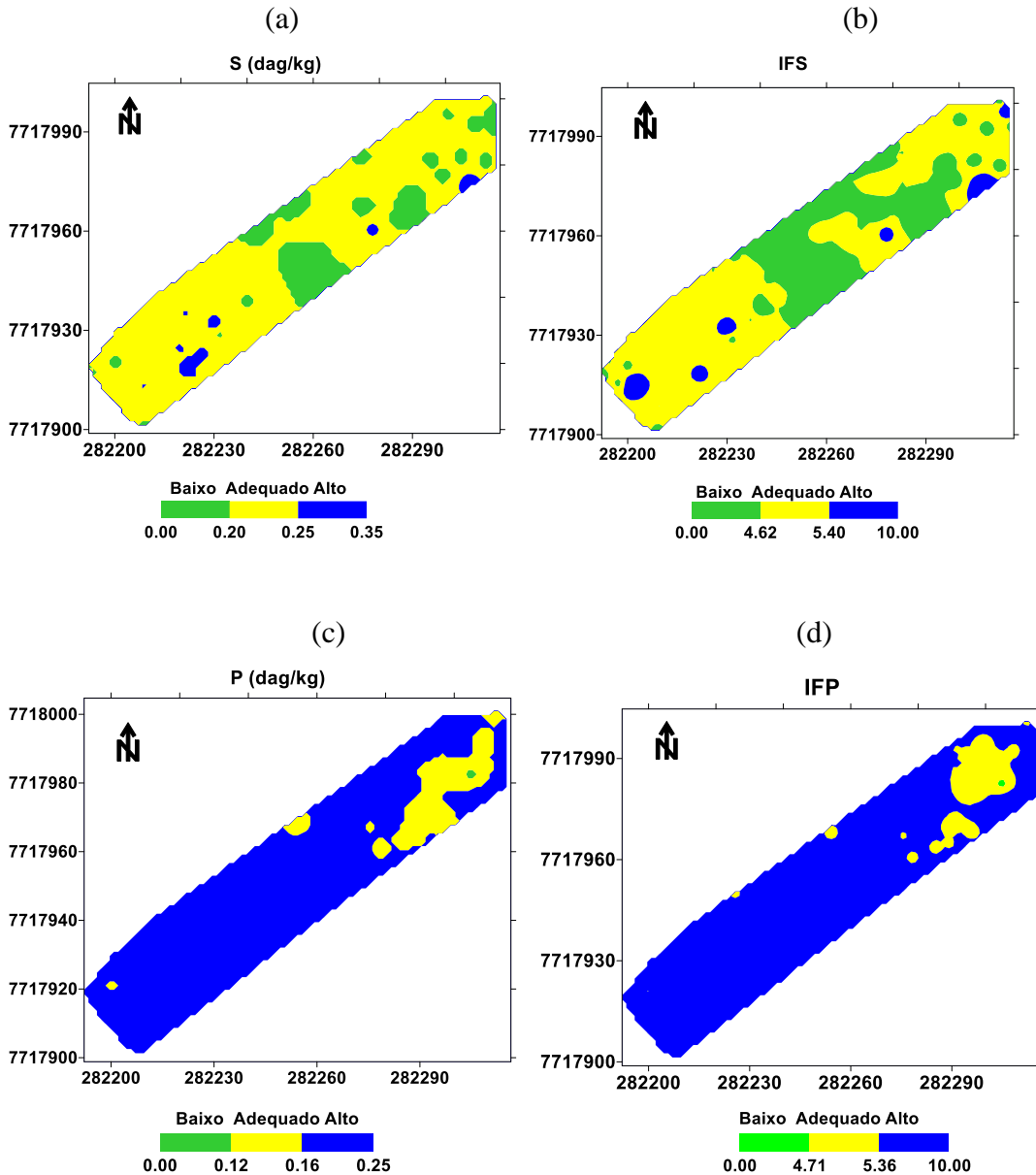


Figura 6. Distribuição espacial do S (a), IFS (b), P (c) e IFP (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS).

O P mostra ligeira redução de área da faixa adequada de suficiência (cor amarela) quando os dados foram defuzzificados e mostra que não aparecem regiões com plantas com concentrações baixas para este nutriente na fase final de maturação dos frutos. Domingues et al. (2019) encontraram 100% na faixa de baixa suficiência, em lavouras de café conilon em Rondônia, nas análises realizadas do estado nutricional com valores de referência do Espírito Santo e da

região Amazônica. Fonseca et al. (2019b) encontraram 56% na safra de 2015/2016 e na faixa adequada e 85% na faixa adequada na safra 2016/2017, nesta mesma lavoura.

A porcentagem da área (PA) em cada faixa de suficiência nutricional também foi quantificada para os dois métodos nos mapas construídos da distribuição espacial, que está apresentado na Tabela 6, bem como a correlação de Pearson entre os dados originais *versus* defuzzificados (r_L) entre os mapas (r_F), bem como os coeficientes de concordância (d) e confiança (c).

Os nutrientes N e K se encontram na quase totalidade da faixa de baixa suficiência e que, segundo Santos, Gatiboni e Kaminsk (2008), quando o teor de nutriente é baixo, a dose aplicada deve ser de forma que recomponha a exportação pela cultura para alcançar ou manter o teor ótimo.

Considerando a porcentagem de área (PA) para os nutrientes dos tecidos foliares na faixa de baixa suficiência (cor verde), observa-se que os valores para S foram de 49,40% e 18,91% para defuzzificado e dados originais, respectivamente. Outra observação é que o P manteve praticamente a mesma proporção de área nas três faixas de suficiência, nos dois métodos.

A exigência nutricional pela faixa de suficiência (FS) para os macronutrientes na lavoura na época da amostragem, final da maturação dos frutos, analisado pela porcentagem de área (PA) na faixa de baixa suficiência (cor verde), é $N=K>Mg>S>P>Ca$. O grande percentual do Ca na faixa de alta se dá pela aplicação da calagem como mencionado anteriormente.

Após a classificação fuzzy, fez-se a correlação entre os valores de entrada *versus* de saída para os macros e dos micronutrientes. Nota-se, alta correlação para os macronutrientes variando de 0,84 a 0,98 e para os micronutrientes o coeficiente r_L variou de 0,68 a 0,87. Estes valores permitiram que os dados após a fuzzificação construíssem mapas similares, mas para alguns nutrientes, a similaridade foi baixa quando se comparou os mapas, pois o coeficiente r_F é influenciado na estimativa de valores para locais não amostrados; a amplitude total e o CV dos dados, mesmo não havendo *outliers*, conforme mencionado Alves e Vecchia (2011), pode influenciar na similaridade entre os mapas. O fato do N ($r_F = 0,67$) estar na faixa de baixa e o Zn ($r_F = 0,61$) na de alta na totalidade dos mapas, os valores em cada faixa não apresenta distribuição espacial com similaridade nestas regiões na lavoura.

O r_F com valores acima de 0,80 foi obtido para K, Ca, Mg, S, P e Fe, sendo que os demais nutrientes ficaram abaixo deste valor, que é uma avaliação quantitativa. O índice de concordância (d) faz a comparação qualitativa entre os mapas, apresenta valores menores que 0,85, com exceção para o N (0,67) e o Zn (0,61).

Segundo a classificação de Camargo e Sentelhas (1997), o índice de confiança (c) menor que 0,40 é péssimo, para N (c = 0,27) e Zn (0,23); sofrível entre 0,51 a 0,60, para o Cu (c = 0,56); bom de 0,66 a 0,75, para o Mn (c = 0,70); muito bom de 0,76 a 0,85, para K, S, Fe e B; e ótimo maior que 0,85, para Ca, Mg e P. Cabe destacar, que na classificação fuzzy, a escolha dos modelos matemáticos e dos intervalos para a definição das faixas, cada variável linguística, é uma escolha sensível que pode afastar da similaridade entre os mapas da distribuição espacial dos nutrientes foliares.

5.4.2. Micronutrientes

Os mapas da distribuição espacial dos micronutrientes dos tecidos foliares na lavoura do *C. canephora* estão apresentados nas Figuras de 7 a 9, para os dados originais e defuzzificados.

Os mapas, para o Fe, apresentam variações na PA nas faixas de baixa (cor verde) e adequada (amarela) de suficiência entre os métodos, que pode ser influenciado nos limites de cada variável linguística e do método de interpolação utilizado. No entanto, não influenciou no r_F que foi de 0,84 e no índice de concordância de 0,90 para um c = 0,76 (muito bom).

O Mn apresentou PA similares nas três faixas de suficiência e r_F de 0,79, d de 0,88 e c de 0,70 (bom). A variação no percentual de cada classe entre os mapas é de difícil entendimento, uma vez que um valor que se encontra na escala original na faixa de baixa suficiência se mantém com valores na faixa de baixa, por exemplo, após aplicar a classificação fuzzy. Segundo Mazzini e Schettini (2009), o IDW é um método que pode ser classificado como um interpolador com bons resultados estimados e suavização dos dados. O interpolador utilizado pode estar suavizando os valores estimados e com isto mudando de classe, pois o limite é fixo, o que pode levar a variação no percentual de área nas diferentes faixas.

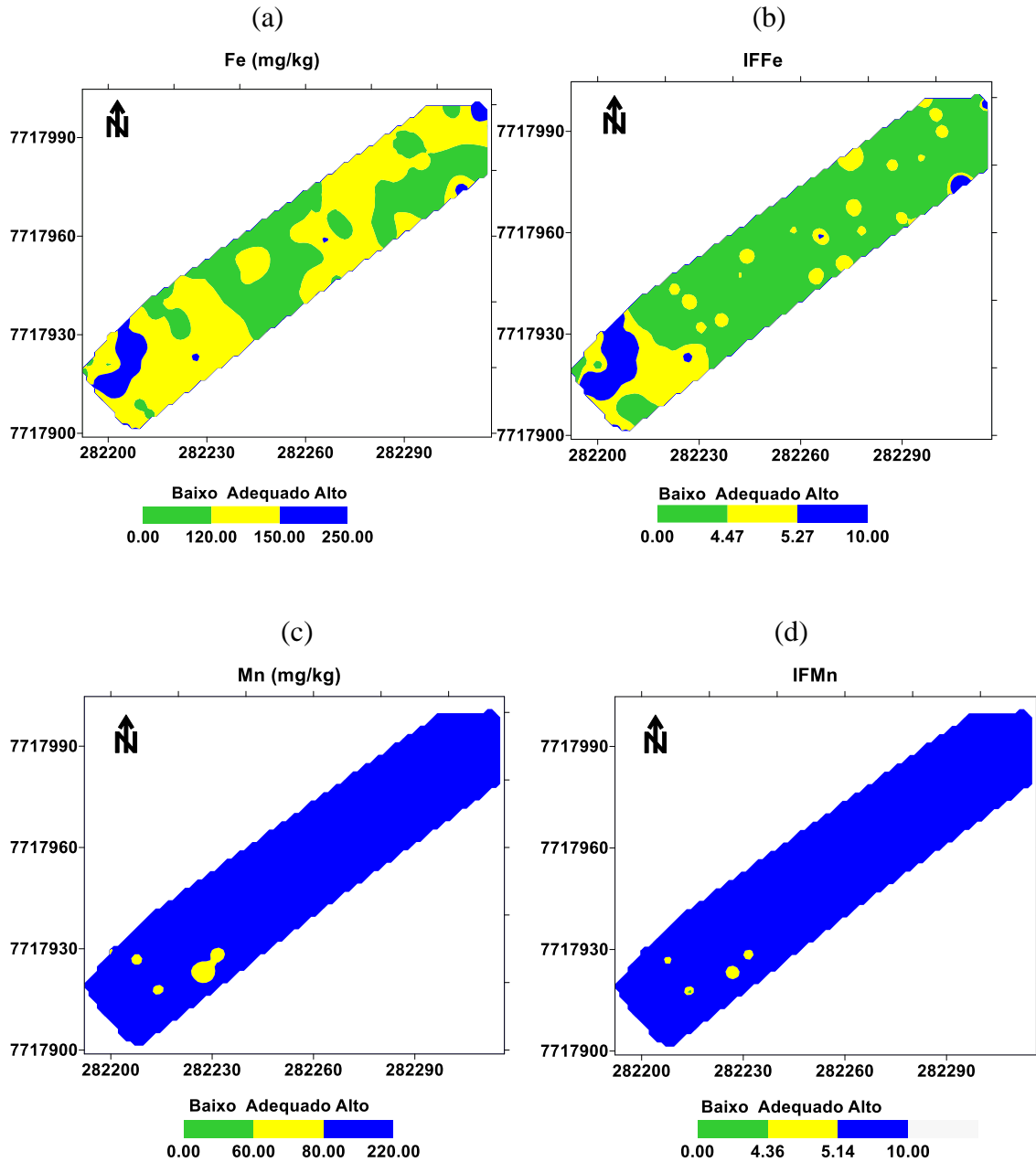


Figura 7. Distribuição espacial do Fe (a), IFFe (b), Mn (c) e IFMn (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS).

Segundo Krohling et al. (2019), cafeeiros arábica da região do Caparaó capixaba possuíam o Mn abaixo da faixa de suficiência após uma safra de 2018 considerada safra alta; já na safra de menor produtividade em 2016, o teor de Mn encontrava-se adequado. Fonseca et al. (2019a) encontraram na interpretação do estado nutricional e da fertilidade do solo, na análise de correlação canônica, que o excesso de Mn no solo influencia na deficiência do K no tecido foliar. Eles observaram que nesta análise se consegue identificar como a concentração do nutriente no solo afeta a sua concentração nos tecidos foliares.

Os mapas da distribuição espacial do B e do Zn estão na Figura 8, com indicação de maior PA na faixa de alta suficiência (cor azul), como mostra a Tabela 7.

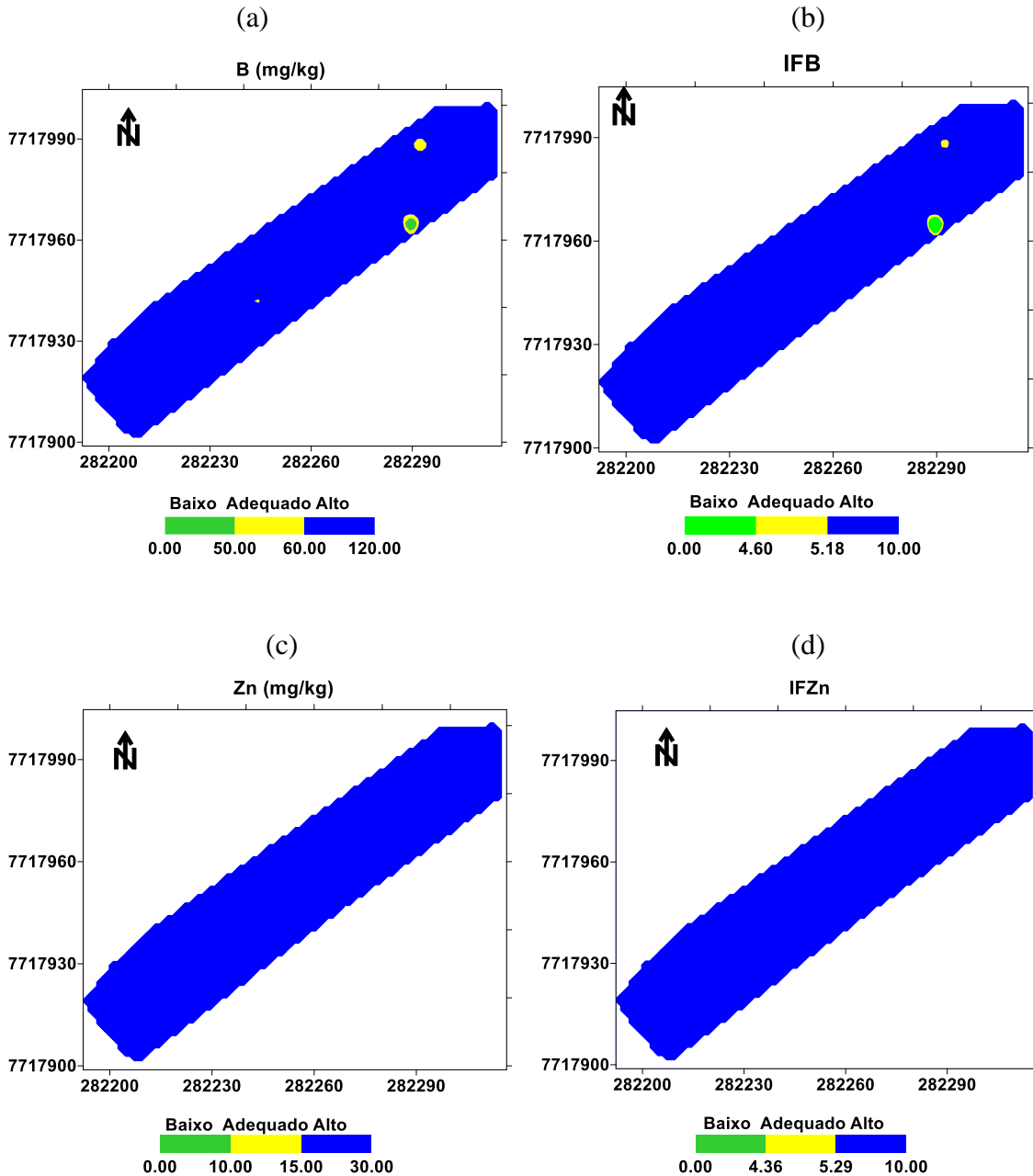


Figura 8. Distribuição espacial do B (a), IFB (b), Zn (c) e IFZn (d) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS).

Para o B, os valores na escala original e na escala fuzzy apresentam r_L de 0,77, entre os mapas r_F de 0,86, índice de concordância de 0,89 e uma confiança de 0,76 do método fuzzy em relação ao mapa dos dados originais. O nutriente Zn está com sua concentração na totalidade na faixa de alta suficiência e com r_L de 0,71, r_F de 0,61, d de 0,37 e c de 0,23. A explicação possível para

a baixa concordância está relacionada com o distanciamento do menor valor e do maior valor na classe adequada na modelagem fuzzy e a não simetria do modelo trapezoidal.

Os mapas do Cu estão na Figura 9, indicando maior PA para as faixas adequada e alta suficiência, com r_L de 0,87, r_F de 0,69, d de 0,81 e c de 0,56. O valor do r_F influenciou na classificação da confiança (c) no mapa da defuzzificado, bem provável pela suavização do método IDW de interpolação.

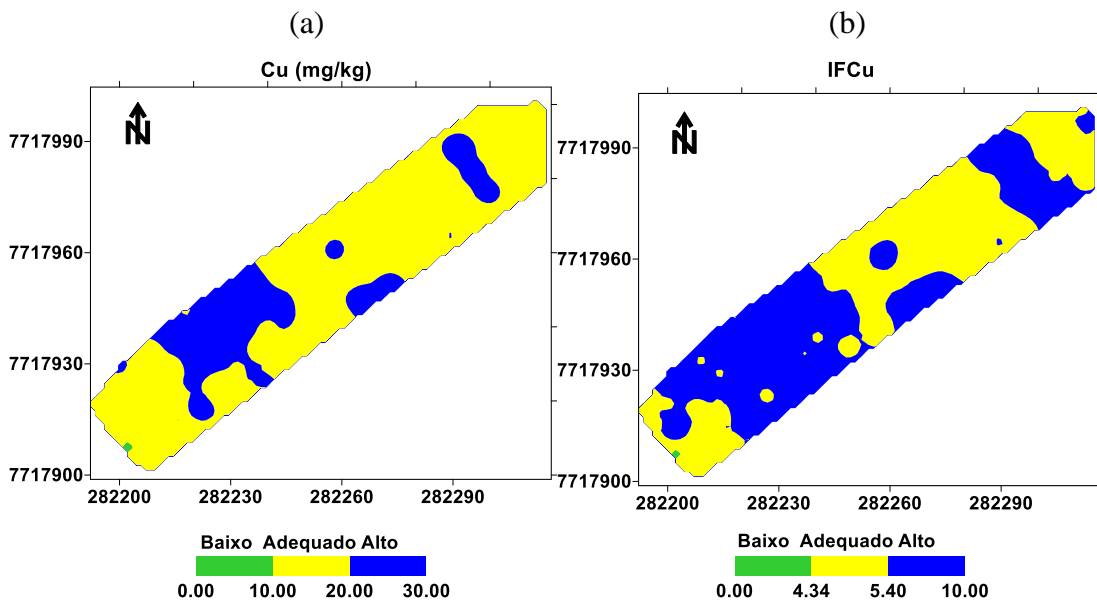


Figura 9. Distribuição espacial do Cu (a) e IFCu (b) nas faixas de Baixo, Adequado e Alto da faixa de suficiência (FS).

Pela FS, a exigência nutricional para os micronutrientes na lavoura na época da amostragem, final da maturação dos frutos, foi feita analisando a porcentagem de área (PA) na faixa de baixa suficiência, sendo $Fe > B > Mn = Cu = Zn$.

Como as faixas de suficiência são definidas por limites rígidos, observa-se alteração na forma dos mapas de alguns nutrientes comparativamente com os dados originais e os defuzzificados. Este fato pode estar relacionado com o método de interpolação que estima valores para locais não amostrados e estes valores podem mudar de faixa, principalmente, para valores próximos aos respectivos limites.

Tabela 6. Resultado da porcentagem de área (PA%) nos mapas para as três classes da faixa de suficiência para os dados defuzzificados e originais e o coeficiente de correlação linear (r_L) entre os dados originais e após defuzzificados e, também, entre os mapas (r_F)

Nutrientes	Original			Fuzzy			r_L	r_F	d	c
	BA	AD	AL	BA	AD	AL				
Macronutrientes										
N	99,30	0,70	0,00	99,60	0,40	0,00	0,95	0,67	0,41	0,27
Ca	0,00	13,18	86,82	0,00	12,55	87,45	0,93	0,95	0,98	0,93
K	99,90	0,10	0,00	99,79	0,19	0,02	0,86	0,95	0,85	0,81
Mg	52,39	25,52	23,09	53,47	17,04	29,48	0,98	0,99	0,99	0,98
S	18,91	78,97	2,13	49,40	45,65	4,94	0,94	0,85	0,90	0,77
P	0,14	13,83	86,02	0,02	16,39	83,60	0,84	0,91	0,94	0,86
Micronutrientes										
	BA	AD	AL	BA	AD	AL	r_L	r_F	d	c
Fe	39,15	55,18	5,67	75,71	17,62	6,67	0,78	0,84	0,90	0,76
Mn	0,00	1,77	98,23	0,00	0,73	99,27	0,68	0,79	0,88	0,70
B	0,25	0,61	99,14	0,39	0,32	99,29	0,77	0,86	0,89	0,76
Zn	0,00	0,00	100,0	0,00	0,00	100,0	0,71	0,61	0,37	0,23
Cu	0,00	75,30	24,70	0,00	49,30	50,70	0,87	0,69	0,81	0,56

BA: Baixo; AD: Adequado; AL: Alto, r_L : coeficiente correlação entre os dados originais e após defuzzificação e r_F : coeficiente de correlação entre os mapas com os dados originais e após defuzzificação; d: índice de concordância; e c: índice de confiança.

5.4.3. Mapas médios

Os mapas médios dos macros (MMacro) e dos micronutrientes (MMicro) para auxiliar na orientação da adubação de produção estão apresentados nas Figuras 10 e 11. Os limites inferiores (LI) e superiores (LS) destes mapas foram estabelecidos com a média dos limites dos nutrientes de cada.

O MMacro apresenta PA de 69,35% na faixa de baixa e 30,45%, adequada suficiência (Figura 10). Este resultado mostra que os valores na faixa de alta para o P e o Ca não estão refletidos no zoneamento médio de manejo, que indica a necessidade de reposição de N, K, Mg e S, nesta análise.

A adubação de Ca na lavoura não será necessária, pois a sua aplicação provocará o consumo de luxo, que poderá influenciar na absorção de outros nutrientes e ainda causar custos de produção desnecessários, conforme estudado por Vieira (2020) em café arábica. O MMacro é balizador para o manejo da área, mas a aplicação de N e K deve ser em toda extensão da área, pois a suas concentrações se encontram abaixo do limite inferior de suficiência.

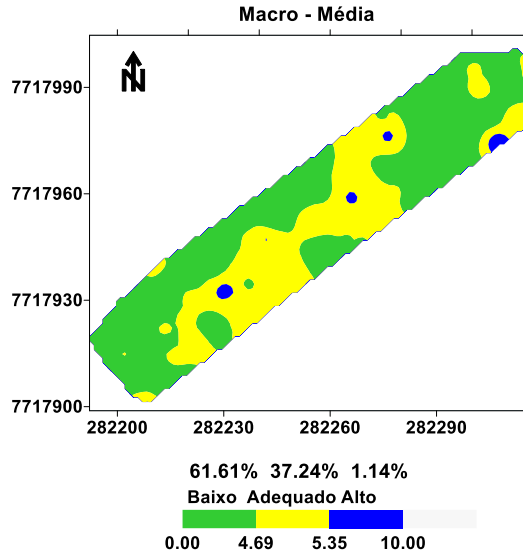


Figura 10. Distribuição espacial média e porcentagem de área (PA), por faixa de suficiência dos dados defuzzificados, para os macronutrientes considerando as faixas de suficiência (FS).

O MMicro está apresentado na Figura 11, indicando que em média todos micronutrientes estão na faixa de alta suficiência, apontando que a média foi influenciada pelos valores extremos dos micronutrientes Mn, B e Zn, já que o Fe está em sua maioria na faixa de baixa suficiência com 75,71% no mapa defuzzificado, e no mapa original do Cu seus teores estão a maioria (75,30%) na faixa adequada de suficiência, ou seja, seguindo o mapa MMicro o Fe e o Cu possam afetar a próxima colheita por deficiência.

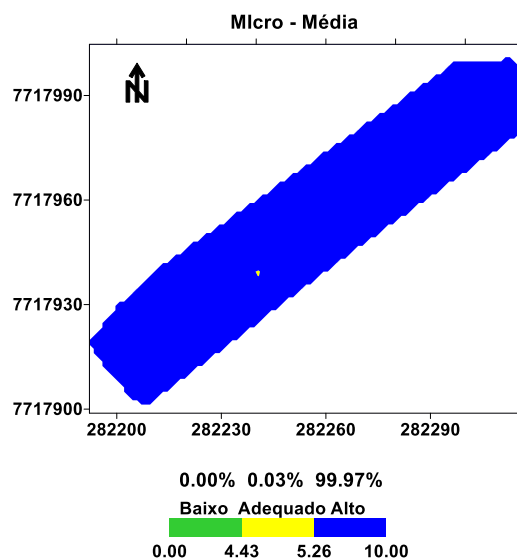


Figura 11. Distribuição espacial média e porcentagem de área (PA), por faixa de suficiência, para os micronutrientes.

5.4.4. Produtividade

A distribuição espacial da produtividade (Prod) na área está representada na Figura 12 para os dados originais e os defuzzificados. A correlação linear entre os valores originais ($\text{sc} \cdot \text{ha}^{-1}$) e os índices fuzzy foi de $r_L = 0,99$, assim como para o r_F . O índice de concordância (d) entre os mapas foi de 0,99 e confiança (c) de 0,98.

Verifica-se que a região de maior produtividade está localizada na parte central da área com certa semelhança com o mapa do Mg que está na Figura 5. A produtividade média na área foi de $100,69 \text{ sc} \cdot \text{ha}^{-1}$.

A produtividade de uma cultura agrícola pode ser afetada por diversos fatores, tais como: descrito por Oliveira et al. (2010), que afirmam que a variabilidade espacial em uma área agrícola pode estar relacionada com o fato do manejo da lavoura não ser localizado. Lima et al. (2016) comentaram que outra variante a considerar é a poda que se faz na lavoura não possibilitando manter o mesmo número de ramos ortotrópicos das plantas entre as safras, bem como condições climáticas e de fertilidade do solo.

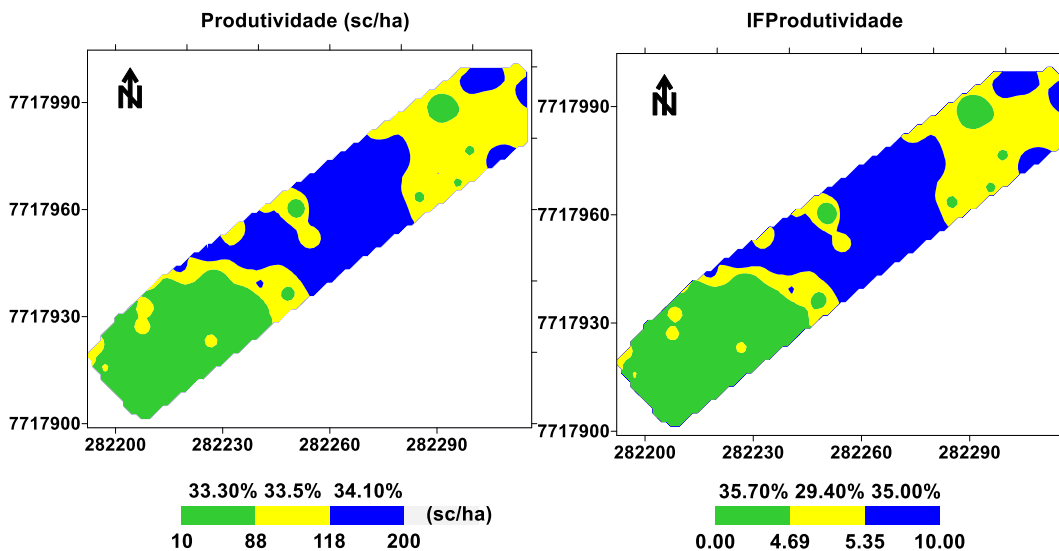


Figura 12. Distribuição espacial da produtividade da lavoura com dados originais e após defuzzificação.

5.5. Interpretação do DRIS e do IBN

A ordem de limitação nutricional e o DRIS médio (DRISm) da lavoura estão na Tabela 7, onde se fez a relação dois a dois dos nutrientes. Verifica-se diferença quando se utiliza a FS que avalia os nutrientes de forma isolada. Observa-se, pela ordem, que a limitação por deficiência é o N e por excesso é o Zn.

Tabela 7. Resultados dos índices DRIS

Ordem de limitação										
N>	Ca>	Mg>	S>	P>	K>	Mn>	Fe>	B>	Cu>	Zn
DRISm										
IN	ICa	IMg	IS	IP	IK	IMn	IFe	IB	ICu	IZn
-16,17	-11,64	-9,51	-6,95	-5,59	0,61	2,59	2,86	6,99	10,47	34,39
Correlação: IBNm <i>versus</i> Índice dos nutrientes										
-0,60*	-0,81*	-0,78*	-0,48*	-0,18	-0,08	0,006	0,36*	0,35*	0,51*	0,80*
Correlação: Produtividade <i>versus</i> Índices dos nutrientes										
0,03	0,26*	0,33*	-0,26*	0,14	0,38*	0,25*	-0,20	-0,23*	0,07	0,02

IN (Índice DRIS do nitrogênio); ICa (Índice DRIS do cálcio); IMg (Índice DRIS do magnésio); IS (Índice DRIS do enxofre); IP (Índice DRIS do fósforo); IK (Índice DRIS do potássio); IMn (Índice DRIS do manganês); IFe (Índice DRIS do ferro); IB (Índice DRIS do boro); ICu (Índice DRIS do cobre); e IZn (Índice DRIS do zinco); *correlação significativa ($p < 0,05$).

O N e o Zn foram os nutrientes que apresentaram menor e maior porcentagem de área (PA) na análise dos dados originais e defuzzificado, assim como na ordem de limitação dos nutrientes no DRIS. Todos os macronutrientes aparecem com índices negativos e o Ca aparece como o segundo elemento limitante no estado nutricional, mostrando que sua alta concentração nos tecidos foliares está contribuindo para o desbalanceamento nutricional da lavoura. O IK (0,61), IMn (2,59) e IFe (2,86) estão com os menores valores, indicando que estão em equilíbrio na lavoura no momento da análise.

A correlação entre os IBNm *versus* os índices DRIS dos nutrientes tem-se os maiores coeficientes para os mais limitantes e os mais em excesso. Para IBNm *versus* ICa e o IMg apresentam valores de $r = -0,81$ e $r = -0,78$, sendo que o Ca aparece com 0,0% e o Mg com 53,47% na faixa de baixa suficiência da porcentagem de área (PA), respectivamente. Costa (1999) encontrou relação Ca/Mg de 4,5:1 e índice DRIS próximo de zero para esses nutrientes no cafeeiro conilon, contra 5,18:1 na presente pesquisa. Mas, Partelli et al. (2016) afirmam que

o Ca se apresenta em alta concentração no tecido foliar na época da pré-florada, em decorrência da calagem que é realizada.

A correlação entre Ca *versus* Mg foi de 0,85 e para o ICa *versus* IMg foi de 0,86, mostrando que estes macronutrientes têm alta correlação positiva entre si.

O IBNm obteve valores de 7,5, 9,8 e 14,0 para menor, médio e máximo, respectivamente. Cabe destacar que o mapa da distribuição espacial do IBNm apresenta correlação significativa com o da produtividade da lavoura, para r de 0,65.

O mapa da distribuição espacial do índice de balanço nutricional médio (IBNm) está apresentado na Figura 13. Nota-se que, a área está com 2,83% entre 11,5 a 14,0 (cor azul); de 57,90% entre 9,5 e 11,5 (cor amarela) e de 39,30% entre 7,5 e 9,5 (cor verde) do IBNm.

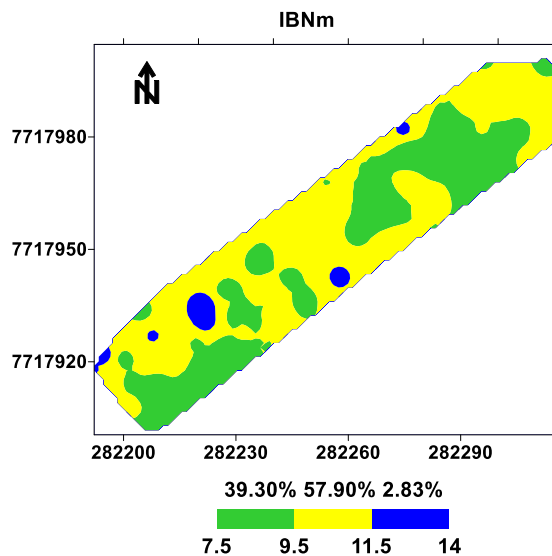


Figura 13. Distribuição espacial do índice de balanço nutricional (IBNm) da lavoura.

6. CONCLUSÕES

A metodologia da classificação fuzzy na padronização dos limites inferior (LI) e superior (LS) dos macros e dos micronutrientes do tecido foliar do cafeeiro conilon mostrou resultados satisfatórios para os nutrientes com menor amplitude, distância do menor e do maior valor em relação aos limites (LI e LS), o que contribui para a simetria do modelo trapezoidal (faixa adequada) e melhores correlações com os dados de entrada e de saída fuzzy.

A escolha dos modelos matemáticos e seus respectivos limites, em cada faixa de suficiência, na metodologia fuzzy são variáveis sensíveis e influenciam diretamente na definição dos graus de pertinência e, conseqüentemente, na distribuição espacial dos índices fuzzy.

A classificação dos dados dos nutrientes foliares em graus de pertinência fuzzy possibilitou a construção do mapa médio do estado nutricional indicando as faixas de suficiência, para os macros e para os micronutrientes.

A análise conjunta do estado nutricional com os dados em graus de pertinência fuzzy, nas faixas de suficiência, e pelo sistema integrado de diagnose e recomendação fornece resultados mais conclusivos. Tendo, como exemplo, o Ca que se encontra com a sua concentração na lavoura, na quase totalidade, na faixa de alta está contribuindo negativamente no balanço nutricional.

O índice de balanço nutricional médio (IBNm) apresentou correlação significativa com a produtividade, porém baixa concordância entre os seus mapas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCORSI, W.R.; HAAG, H.P. Alterações morfológicas e citológicas do cafeeiro (*Coffea arabica* L., var. Bourbon (B. Rodr.) Choussy) cultivado em solução nutritiva, decorrentes das deficiências e excessos dos macronutrientes, **Revista Café Portuguesa**, v. 6, p. 5–19. 1959.
- ALLOWAY, B. J. **Zinc in Soil and Crop Nutrition**. Brussels, Bélgica. p. 116, 2004.
- ALVAREZ V., V.H.; LEITE, R.A. Fundamentos estatísticos das fórmulas usadas para cálculos dos índices dos nutrientes no Sistema Integrado de Diagnóstico e Recomendação - DRIS. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. **Anais**. Piracicaba, SBCS, 1992. p.186-188.
- ALVES, E. D. L.; VECCHIA, F. A. S. Análise de diferentes métodos de interpolação para a precipitação pluvial no Estado de Goiás. **Acta Scientiarum**. v. 33, n. 2, p. 193-197, 2011.
- ALVES, M. D. C. **Geoestatística e sistemas 'fuzzy' na proteção de plantas**. Universidade Federal de Lavras (Doutorado em Fitopatologia), Lavras, 2006.
- ANDRADE, C. E. **Calagem e adubação do café**. Viçosa: Aprenda Fazer, 2001. 130p.
- ANDRADE, W. E. de B., FERREIRA, J. M., REGO FILHO, L. de M., SOUZA FILHO, B.F. de; Estado nutricional do café conilon no norte fluminense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 38., 2012, Caxambu. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa Café, 2012.
- ANDREINI, C.; BERTINI, I; ROSATO, A. Metalloproteomes: a bioinformatic approach. **Accounts of chemical research**, v. 42, n. 10, p. 1471-1479, 2009.
- BALDOCK, J.O.; SCHULTE, E.E. Plant analysis with standardized scores combines DRIS and sufficiency range approaches for corn. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, p.448-456, 1996.
- BAUER,P.; HELL, R. 2006. Translocation of Iron in Plant Tissues. In: BARTON, L.L.; ABADIA, J. (Eds.). **Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms**. Springer, Dordrecht, p.279-288. 2006.
- BEAUFILS, E.R. Diagnosis and recommendation integrated system (DRIS). **A general scheme of experimentation and calibration based on principles developed from research in plant nutrition**. South Africa: University of Natal, Pietermaritzburg. 132p. 1973.

BECANA M, MORAN JF, ITURBE-ORMAETXE I.; Iron dependent oxygen free radical generation in plants subjected to environmental stress: toxicity and antioxidante protection. *Plant and Soil* 201, 137–147, 1998.

BIENFAIT H. F.; Prevention of stress in iron metabolism of plants. *Acta Bot. Neerl.* 38, 1989. 105–129.

BRAGANÇA, S. M. **Crescimento e acúmulo de nutrientes pelo C. canephora (Coffea canéfora Pierre)**. 2005. 99 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 2005.

BRAGANÇA. S. M.; PREZOTTI. L. C.; LANI. J. A. Nutrição do C. canephora. In: FERÃO et. al. **Café Conilon**. Incaper ed. Vitória: p. 299–327. 2007.

BRESSAN, G.M. et al . Sistema de classificação fuzzy para o risco de infestação por plantas daninhas considerando a sua variabilidade espacial. **Planta daninha**, Viçosa, v. 24, n. 2, p. 359-364, 2006.

BRIAT, J. F.; CELLIER, F.; GAYMARD, F. Ferritins and iron accumulation in plant tissues. In **Iron Nutrition in Plants and Rhizospheric Microorganisms**. pg. 341–357. 2006.

BRIAT J.F., LOBREAUX S.; Iron transport and storage in plants. **Trends Plant Sci** 2:187–193. 1997.

CAKMAK, I.; YAZICI, A. M. Magnésio: um elemento esquecido na produção agrícola. **BetterCrops**, v. 94, n. 2, p. 23-25, 2010.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 89-97, 1997.

CAMPOS FILHO, P. **Método para apoio à decisão na verificação da sustentabilidade de uma unidade de conservação, usando lógica Fuzzy**. 2004. 210 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis

CARVALHO, L. C. C.; SILVA, F. M; FERRAZ, G. A. S; FIGUEIREDO, V. C; CUNHA, J. P. B. Comparação entre amostragem foliar convencional e de precisão para análise de micronutrientes na cafeicultura. **Coffee Science**, v. 12, n. 2, p. 272–281, 2017.

COLEMAN, J.E. Zinc enzymes. **Current Opinion in Chemical Biology**, London, v.2, n. 2, p.222-234. 1998.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira de café**, v. 5, safra 2019, quarto levantamento, Brasília, p. 1-44, dez. 2019. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/index.php/info-agro/safra/caf%C3%A9>> Acesso em: 04/2020.

COSTA, A.N. Aplicação do sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) em cafeeiros Conilon (*Coffea canephora*) e arábica (*Coffea arabica*). In: SIMPÓSIO MONITORAMENTO NUTRICIONAL PARA RECOMENDAÇÃO DA ADUBAÇÃO DE CULTURAS, 1., Piracicaba, 1999. **Anais**. Piracicaba, Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 1999.

COVRE, A. M.; PARTELLI, F. L. Parcelamento da adubação para o café Conilon cultivado na Bahia. In: PARTELLI, F.L.; BONOMO, R. (Orgs.). **Café Conilon: o clima e o manejo da planta**. Alegre: CAUFES, p. 125-132, 2016.

COVRE, A. M.; PARTELLI, F. L. BONOMO, R.; COCHICHO, J. Impacts of water availability on macronutrients in fruit and leaves of Conilon coffee. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, n. 9, p. 1025-1037, 2018.

DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre, Artmed. 2006.

DIAS, J. R. M.; TUCCI, C. A. F.; WADT, P. G. S.; PARTELLI, F. L.; PEREZ, D. V.; TOMIO, D. B. Antecipação do período de diagnose foliar em laranja 'Pêra' no Amazonas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 48, p. 757- 764, 2013.

DOMINGUES, C.G.; SILVA, C. A. da; TURCATO, C. S.; BRAVIN, N. P.; LUZ, S. R. O. T. da; SILVA, J. dos S.; SILVA, I. dos S.; DIAS, J. R. M.; SCHMIDT, R.; Avaliação nutricional de cafeeiros clonais em Alta Floresta D'Oeste – RO. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 10., 2019, Vitória. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa Café, 2019, 5 p.

DONAGEMA, G.K.; CAMPOS, D.V.B. de; CALDERANO, S.B.; TEIXEIRA, W.G.; VIANA, J.H.M. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. rev. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p. (Embrapa Solos. Documentos, 132).

EPSTEIN, E; BLOOM, A. 2006. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Londrina: Planta. 403p.

FAQUIN, V. **Diagnose do estado nutricional das plantas**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 77 p.

FARNEZI, M. M. M., SILVA, E. B.; GUIMARÃES, P. T. E.; PINTO, N. A. V. D. Levantamento da qualidade da bebida do café e avaliação do estado nutricional dos cafeeiros do Alto Jequitinhonha, Minas Gerais, Através do DRIS. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 34, p. 1191-1198, 2010.

FERRÃO, R. G.; FONSECA, A. F. A. da; BRAGANÇA, S. M.; FERRÃO, M. A. G.; DEMUNER, L. H. (Ed.). **Café Conilon**. Vitória: INCAPER, 2007. 702 p.

FONSECA, A. S. 2018. **Mapeamento do estado nutricional, produtividade e qualidade de bebida do café conilon**. Tese, Universidade Federal do Espírito Santo, UFES. 2018. 121f.

FONSECA, A. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A. XAVIER, A. C.; DRUMOND NETO, A. P. Spatial variability of the productivity and the nutritional condition of *Coffea canephora*. **Coffee Science**, v. 10, n. 4, p. 420 - 428, 2015.

FONSECA, A. S.; LIMA, J. S. S.; DARDENGO, M. C. J. D.; SILVA, S. A.; XAVIER, A. C. Canonical Correlation between Soil Attributes and Foliar of Conilon Coffee Trees. **Journal of Experimental Agriculture International**, v. 35, n. 3, p1-14, 2019a.

FONSECA, A. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S.; DARDENGO, M. C. J. D. Fuzzy logic in the spatial and temporal distribution in the quality the beverage in conilon coffee. **Coffee Science**, Lavras, v. 14, n. 2, p. 163 - 172, 2019b.

FONTES, P. C. R. **Diagnóstico do Estado Nutricional das Plantas**. Editora UFV. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa/MG. 2001. 122p.

GAMMA DESIGN SOFTWARE, GS⁺ - **Geostatistics for the Environmental Sciences, Version 5,0**. Michigan: 1998, 1 CDROM.

GONÇALVES, A. O.; **Zoneamento Agroclimático e aptidão de cultivo do cacaueteiro a pleno sol no Estado do Espírito Santo, Brasil**. 2019. 91f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Santa Cruz. UESC, BA.

GUIMARÃES, R. J., MENDES, A. N. G., SOUZA, C. A. S. Nutrição do cafeeiro: extração de nutrientes, calagem e gessagem nas fazes de plantio, formação e produção. *In*: Guimarães, R. J., Mendes, A. N. G., Souza, C. A. S. (ed.) **Cafeicultura**. Lavras: UFLA/FAEPE, p. 194-234. 2002.

GURZAU, E.S.; NEAGU, C.; GURZAU, A.E.; **Essential metals—case study on iron** Ecotoxicology and Environmental Safety, 56 (2003), pp. 190-200.

HERMANS, C; HOHNSOS, N. G; STRASSER.R.J; VERBRUGGEN, N.F.
Physiological characterization of magnesium deficiency in sugar beet: acclimation to low magnesium differentially affects photosystems I and II. **Planta**, v. 220, n. 2, p.344–355, 2004.

JEONG, J., CONNOLLY, E.L. Iron uptake mechanisms in plants: functions of the FRO family of ferric reductases. **Plant Science**. 176, 709-714. 2009.

JONES, C.A.; Proposed modifications of the Diagnosis and Recommendation Integrated System (DRIS) for interpreting plant analyses. **Commun. Soil Sci. Plant Anal.** 12:785–794, 1981.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia vegetal**. 2.ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008. 431p

KOBAYASHI, T., NISHIZAWA, N.K. Iron uptake, translocation, and regulation in higher plants. **Annual review of plant biology** 63, 131-152. 2012.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes. 1928. Wall-map 150cmx200cm.

KROHLING, C. A.; SOBREIRA, F. M.; SOUSA, M. F. de; LIMA, T. L. B. de; ROCHA, W. de A.; FORNAZIER, M. J.; Estado nutricional do café arábica em baixa densidade populacional após tipos de poda, região do Caparaó Capixaba. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 10., 2019, Vitória. **Anais...** Brasília, DF: Embrapa Café, 2019, 5 p.

KURIHARA, C.H.; ALVAREZ VENEGAS, V. H.; LIMA NEVES, J. C.; FERREIRA DE NOVAIS, R.; STAUT, L. A. Faixas de suficiência para teores foliares de nutrientes em algodão e em soja, definidas em função de índices DRIS. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, n. 3, p. 412-419, 2013.

KURIRAH, C.H.; MAEDAS, S.; ALVAREZ, V.H. **Interpretação de resultados de análise foliar**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste e Florestas, 2005. 47p. (Documentos, 74)

LAVIOLA, B.G.; MARTINEZ, H.E.P.; SALOMÃO, L.C.C.; CRUZ, C.D.; MENDONÇA, S.M.; ROSADO, L. Acúmulo em frutos e variação na concentração foliar de NPK em cafeeiro cultivado em quatro altitudes. **Bioscience Journal**, v. 24, n. 1, p. 19-31, 2008.

LIMA, J. S., S.; COSTA, F. P.; XAVIER, A. C.; SILVA, S. A. Fuzzy Classification in the Determination of Input Application Zones. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v. 40, p. 1-15. 2016.

LIMA FILHO, O.F. de. **Calibração de boro e zinco para o cafeeiro (*Coffea arabica* L. cv. Catuaí amarelo)**. Piracicaba: ESALQ/USP, 1991. 100p. Dissertação Mestrado

MACHOLD, O.; STEPHAN, U. W. The function of iron in porphyrin and chlorophyll biosynthesis. **Phytochemistry**, v. 8, n. 11, p. 2189-2192, 1968.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Ceres, 1980. 251p.

MALAVOLTA, E. Nutrição, adubação e calagem para o cafeeiro In: RENA, A. B.; MALAVOLTA, E.; ROCHA, M. YAMADA, T. (Ed.). **Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba, SP: Potafós, 1986. p. 165-274.

MALAVOLTA, E.; FERNADEZ, D. R.; ROMERO, J. P. Seja doutor do seu cafezal. **Informações agrônômicas**, Campinas, v.64, p.1- 13. 1993.

MARÇAL, R. F. M.; SUSIN, A. A. Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas. **Revista Gestão industrial**, v. 01, n. 2, p. 228-236, 2005.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 2. ed. London: Academic Press, 1995. 889p.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3. ed. London: Elsevier, 2012, 651p.

MARTINEZ, H. E. P.; CARVALHO, J. G.; SOUZA, R. B. Diagnose foliar. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais. 5ª Aproximação**. Viçosa- MG: CFSMG, 1999. p. 143-168.

MARTINEZ, H. E. P.; NEVES, Y. P.; ZABINI, A. V. Diagnóstico do estado nutricional do cafeeiro. In: ZAMBOLIM, L. (Ed.) **Produção integrada de café**, Viçosa, MG: UFV. Cap. 13. p, 397- 441. 2003.

MARTINS, M. C. F. **Estudo da dinâmica do ferro em morangueiro (*Fragaria x ananassa* Dutch) cv. Diamante**. 2017. 59 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade de Lisboa, Lisboa, 2017.

MATIELLO, J. B.; SANTINATO, R.; GARCÍA, A.W.R.; ALMEIDA, S.R.; FERNANDES, D.R. . Podas. In: **Cultura de café no Brasil: novo manual de recomendações**. Rio de Janeiro: MAPA/PROCAFÉ, 2002. p. 256-274.

MAZZINI, P. L. F.; SCHETTINI, C. A. F. Avaliação de metodologias de interpolação espacial aplicadas a dados hidrográficos costeiros quase sinóticos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v.13, n. 1, p. 53-64, 2009.

MOORE, D.P. Mechanisms of micronutrient uptake by plants. In: SYMPOSIUM HELD AT MUSCLE CIIOALS OF MICRONUTRIENTS IN AGRICULTURE, Alabama, 1971. Proceedings . . . Madison, **Soil Science Society of America**, 1972. p.171-98.

OLIVEIRA, R. B.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; ANTUNIASSI, U. R.; SILVA, A. F. **Spatial variability of the nutritional condition of canephora coffee aiming specific manegement**, v. 5, n. 3, p. 190-196, 2010.

ORLANDO FILHO, J. O.; BITTENCOURT, V. C.; CARMELLO, Q. A. C.; BEAUCLAIR, E. G. F. Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. **STAB: Açucar, Álcol e Subprodutos**, Piracicaba, v. 14, n. 5, p. 13-17, 1996.

PARECIDO, R. J.; **Nutrição e produtividade da cultura do café arábica afetadas pela forma de aplicação de calcário e gesso na cultura já implantada**. 2020. 91f. Tese (Doutorado em Agronomia). Botucatu. UNESP, SP.

PARTELLI, F. L.; GOMES, W. R.; OLIVEIRA, M. G.; ESPINDULA, M. C. Normas foliares e diagnóstico nutricional do C. canephora na pré-florada e granação, no Espírito Santo. **Coffee Science**, v. 11, n. 4, p. 544-554, 2016.

PAYNE, G. G., REHCIGL, J. E.; STEPHENSON, R. L. Development of Diagnosis and Recommendation Integrated System norms for Bahiagrass. **Agronomy Journal**, 82:930-934, 1990.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An introduction to fuzzy sets**. Cambridge, MA: MIT Press, 1998. 480 p.

PREZOTTI, L. C; BRAGANÇA, S. M. Nutrição. In: COSTA. E. (Coord.). **Manual técnico para a cultura do café no Estado do Espírito Santo**. Vitória - ES: SEAG/ES, 1995. p. 42 – 53.

PREZZOTI, L. C.; GOMES, J. A.; DADALTO, G. G.; OLIVEIRA, J. A. **Manual de recomendação de calagem e adubação para o Estado do Espírito Santo. 5ª aproximação.** Vitória, ES, SEES/INCAPER/CEDAGRO, p. 305, 2007.

REIS JÚNIOR, R. dos A.; CORRÊA, J.B.; CARVALHO, J.G.; GUIMARÃES, P.T.G. Diagnose nutricional de cafeeiros da região sul de Minas Gerais: normas DRIS e teores foliares adequados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.801-808, 2002.

RENA, A.B.; CARVALHO, C.H.S. Causas abióticas da seca de ramos e morte de raízes em café. In: ZAMBOLIN, L. (Org.). **Produção integrada de café.** Viçosa: UFV, 2003. p.197-222.

SANTOS, J. S.; BENICASA, A. X. Modelo de sistema fuzzy para apoio ao processo de decisão sobre áreas de pesquisa. In: SEMANA DE INFORMÁTICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE, 2., 2012, Itabaiana. **Anais.** Itabaiana: DSI/UFV, 2012. p. 37-40.

SANTOS, D. R.; GATIBONI, L. C.; KAMINSKI, J. Fatores que afetam a disponibilidade do fósforo e o manejo da adubação fosfatada em solo sob sistema de plantio direto. **Ciência Rural**, v. 28, n. 2, p. 576-586, 2008.

SANTOS, H.G.; JACOMINE, P.K.T.; ANJOS, L.H.C. dos; OLIVEIRA, V.A. de; LUMBRERAS, J.F.; COELHO, M.R.; ALMEIDA, J.A. de; CUNHA, T.J.F.; OLIVEIRA, J.B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. rev. e ampl.** Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

SANTOS NETO, J. V.; DUARTE, I. N.; CARDOSO, A. F.; LIMA, L. C. de; LANA, R. M. Q.; TORRES, J. L. R.; CAMARGO, R. de. Sistema integrado de diagnose e recomendação para soja em função das doses de níquel, cobalto e molibdênio. **Agrarian, Dourados**, v. 12, n. 43, p. 48-56, 2019. ISSN 1984-2538. Disponível em: <<http://ojs.ufgd.edu.br/index.php/agrarian/article/view/6781>>. Acesso em: 01 jul. 2020.

SENTÜRK, S, Construction of fuzzy c control charts based on fuzzy rule method, Anadolu University **Journal of Science and Technology**. v. 18, n. 3, p. 563-572, 2017.

SERRA, A. P.; MARCHETTI, M. E.; ROJAS, E. P.; MORAIS, H. S. de; CONRAD, V. do A.; GUIMARÃES, F. C. N. Estabelecimento de normas DRIS para o algodoeiro com diferentes critérios de seleção da população de referência. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 11, p. 1472-1480, 2013.

SHAUL, O. Magnesium transport and function in plants: the tip of the iceberg. **Biometals**, 15, 309– 323.2002.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S. Avaliação da variabilidade do estado nutricional e produtividade de café por meio de análise de componente principal e geoestatística. **Revista Ceres**, v. 59, n. 2, p. 271 – 277, 2012.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; QUEIROZ, D. M. Spatial variability in nutritional status of arabic coffee based on dris index. **Revista Ceres**, v. 58, n.2, p. 256-261, 2011.

SNYDER, G. H.; KRETSCHMER, A. E. A DRIS analysis for bahiagrass pastures. **Soil and Crop Sci. Soc. Florida Proc.**, 47:56-59, 1988.

SOUZA, G. S.; LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; XAVIER, A. C. Aplicação de lógica fuzzy e geoestatística na análise da fertilidade de um solo sob pastagem. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 40, n. 3, p. 323-330, 2009.

TAIZ L.; ZEIGER E. **Fisiologia vegetal**. 3. Ed, p. 720. 2004.

TARIQ, M.; MOTT, C. J. B. Effect of Boron on the behavior of nutrients in soil-plant systems – A Review. **Asian Journal of Plant Sciences**, Secunderabad, v. 6, n. 1, p. 195-202, 2007.

TOMAZ, M. A.; MARTINEZ, H. E. P.; RODRIGUES, W. N.; FERRARI, R. B.; PEREIRA, A. A.; SAKIYAMA, N. S. Eficiência relacionada à absorção e utilização de nitrogênio, fosforo, enxofre, em plantas de cafeeiros enxertadas, cultivadas em vasos. **Ciência Agronômica**, v. 33, n. 4, p. 993 – 1001, 2009.

VALLEE, B. L.; FALCHUK, K. H. The biochemical basis of zinc physiology. **Physiological reviews**, v. 73, n. 1, p. 79-118, 1993.

VIEIRA, L. C.; **Nível crítico de cálcio para o desenvolvimento de mudas do café arábica**. 2020. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, USP, Piracicaba, 2020.

WADT, P.G.S. et al. Três métodos de cálculo do Dris para avaliar o potencial de resposta à adubação de árvores de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.651-660, 1998.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 350p.

WILLMOTT, C. J.: ‘**On the Validation of Models**’, *Phys. Geogr.* **2**, 184–194, 1981.

WILLMOTT, C. J. Some Comments on the Evaluation of Model Performance. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 63, p. 1309-1313, 1982.

ZADEH, L. A. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, Vol. SMC-3, No. 1, p. 28-44. 1973.